

Berichte 2 802
aus dem
Institut für Meereskunde
an der
Christian-Albrechts-Universität Kiel
Nr. 68
1979

ZUR WÄRMEBILANZ DER OZEANISCHEN
DECKSCHICHT IM GATE -- GEBIET

On the heat budget of the upper
ocean in the GATE -- area

von
Michaela Knoll

DOI 10.3289/IFM_BER_68

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Michaela Knoll

Institut für Meereskunde

Abt. Meeresphysik

Düsternbrookerweg 20

2300 Kiel

Diese Arbeit wurde 1978 als Diplomarbeit beim Fach-
bereich Mathematik-Naturwissenschaften der Christian-
Albrechts-Universität Kiel eingereicht

ISSN 0347 - 0361

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zielsetzung	1
2. Der verwendete Datensatz	3
3. Die Genauigkeit der Daten	13
4. Allgemeine hydrographische Beschreibung des Meßgebietes .	16
5. Die Wärmebilanzgleichung	21
6. Erläuterung der Wärmebilanzterme	24
6.1. Der Nettowärmeaustausch mit der Atmosphäre	25
6.2. Der Wärmeinhalt einer Wassersäule	30
6.2.1. Die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts	35
6.2.2. Bestimmung der Integrationstiefe	43
6.3. Die Advektion	50
6.4. Abschätzung der horizontalen turbulenten Diffusion	60
7. Die Wärmebilanz der Deckschicht während GATE	61
7.1. Vergleich zwischen der Wärmezufuhr aus der Atmosphäre und der Änderung des Wärmeinhalts	62
7.1.1. Der Einfluß verschiedener Mittlungsintervalle	63
7.1.2. Vergleich des linearen Trends	70
7.1.3. Untersuchung eines kurzen Zeitraums mit besonders starker Einstrahlung	75
7.2. Vergleich der direkt und indirekt berechneten Advektion	79
8. Der Einfluß des Niederschlags auf den Wärmehaushalt	84
9. Modell zur Vorhersage statistischer Eigenschaften der Fluktuationen des Deckschicht-Wärmehaushalts im GATE B/C-Gebiet	88
10. Zusammenfassung	96

II

Table of Contents		Page
1.	Introduction	1
2.	The data set	3
3.	Accuracy of the data	13
4.	General hydrographic conditions	16
5.	The heat balance equation	21
6.	Discussion of the terms in the heat balance equation	24
6.1.	Net heat exchange with the atmosphere	25
6.2.	Heat content of a water column	30
6.2.1.	Temporal changes of heat content	35
6.2.2.	The integration depth	43
6.3.	The advection	50
6.4.	Estimation of the horizontal turbulent diffusion	60
7.	The heat budget of the upper ocean during GATE	61
7.1.	Comparison of the net heat exchange with the atmosphere and the temporal change of heat content	62
7.1.1.	The influence of averaging over different time intervals	63
7.1.2.	Comparison of the linear trends	70
7.1.3.	Examination of a short period with extreme solar radiation	75
7.2.	Comparison of the direct and indirect computed advection	79
8.	The influence of precipitation on the heat budget	84
9.	Model for forecasting the statistical characteristics of the fluctuations of heat content in the mixed layer of GATE R/C-Scale area	88
10.	Summary	96

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst der Versuch unternommen, eine Wärmebilanz der ozeanischen Deckschicht im GATE C-Gebiet aufzustellen. Dabei liegen die Messungen der Forschungsschiffe 'Meteor', 'Planet' und 'Quadra', die Daten der Verankerungen F1 und E3 und die der meteorologischen Boje, die sich 300 m entfernt von FS 'Meteor' befand, zu Grunde.

Bei der Bestimmung des Wärmeinhalts ist die Wahl der Integrationstiefe von großer Bedeutung. Es wird gezeigt, daß eine Integrationstiefe von 20 m am geeignetsten ist, um den vertikalen Wärmetransport durch sie hindurch zu vernachlässigen.

Ein Vergleich zwischen der lokalen Wärmezufuhr aus der Atmosphäre und der Änderung des Wärmeinhalts ergibt, daß die Wärmebilanz wesentlich durch großräumige atmosphärische Ereignisse beeinflusst wird und weniger von lokalen kurzfristigen Vorgängen abhängig ist. Somit ist für die Wärmebilanz eine genaue Bestimmung der advektiven Terme wesentlich, die direkt und indirekt berechnet werden. Leider treten zwischen den beiden Berechnungen erhebliche Unterschiede auf, die hauptsächlich auf die bei dem vorgegebenen Stationsabstand nicht hinreichend genau durchführbare Bestimmung des horizontalen Wärmeinhaltsgradienten und des Stromfeldes, aber auch auf die Vernachlässigung des vertikalen Wärmetransports und der horizontalen turbulenten Diffusion zurückzuführen sind.

Weiterhin wird beobachtet, daß der Niederschlag bezüglich des Wärmehaushalts in dieser Region vernachlässigt werden kann.

Zuletzt wird ein statistisches Modell beschrieben, das aus der großräumigen Verteilung der Einstrahlungsverhältnisse unter Berücksichtigung der mittleren Advektion in der Deckschicht den Wärmeinhalt berechnet. Die Spektren

IV

des gemessenen und berechneten Wärmeinhalts stimmen bis zu einer Periode von 8 Stunden innerhalb des 95%-Vertrauensintervalls überein. Somit eignet sich das Modell im niederfrequenten Bereich sehr gut, um die statistischen Eigenschaften der Fluktuationen des Wärmeinhalts aus den räumlichen Einstrahlungsverhältnissen herzuleiten.

Summary

In this report an attempt is made to compute the heat budget of the upper ocean in the GATE C-Scale area.

Measurements of the research vessels 'Meteor', 'Planet' and 'Quadra' and the data of the F1- and E3-mooring and those of the meteorological buoy 300 m away from F.S. 'Meteor' are used in this discussion.

For determining the heat content it is important to find the appropriate depth of integration. It is shown that a depth of 20 m is the best compromise for neglecting the vertical heat transport.

The local net heat exchange between ocean and atmosphere is compared with the temporal change of heat content in the upper ocean. It turns out that the heat budget is more influenced by large scale atmospheric processes than by brief and local transfer events. So a determination of advection is important for calculating the heat budget. Unfortunately there are great differences between the advective terms computed directly and indirectly. This is due to the lack of sufficiently accurate current and horizontal heat content gradient measurements and the neglect of vertical heat transport and horizontal turbulent diffusion. Precipitation can be neglected in the heat budget calculations.

Finally a statistical model is described taking account of shortwave incoming radiation in the GATE B/C-Scale area and the advection in the mixed layer. Up to a period of 8 hours there is no significant difference between the spectra of the measured and the computed heat content. So in the low frequency band the model can be used successfully for deriving the statistical properties of the heat content fluctuations from the large scale distribution of the incoming radiation.

1. Zielsetzung

Das GATE-Experiment, das 1974 im tropischen Atlantik stattfand, diente zum Teil dazu, die Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre zu erweitern. Besonders interessant sind dabei die Flüsse durch die Meeresoberfläche in Horizontalskalen von 100 Km bis 1000 Km, die den tropischen atmosphärischen Konvektionszellen entsprechen. Jene 'Cloud Cluster', die mit einer wellenförmigen Bewegung entlang der Intertropischen Konvergenzzone nach Westen wandern, haben in diesem Größenbereich, der dem B/C-Meßgebiet zu Grunde lag, eine mittlere Lebensdauer von einem Tag (Martin, 1975). Der Hauptteil der ozeanographischen Arbeiten beruht in der Untersuchung der Deckschichtentwicklung im GATE C-Gebiet, dessen Horizontalskala im Bereich zwischen 10 Km und 100 Km liegt und somit den meso-skalierten Konvektionselementen innerhalb der 'Cloud Cluster' entspricht. Ihre mittlere Lebensdauer beträgt circa 18 Stunden.

In dieser Arbeit soll nun der Versuch unternommen werden, eine Wärmebilanz der ozeanischen Deckschicht im GATE C-Gebiet aufzustellen. Zwar wäre es auf Grund der atmosphärischen Bedingungen dieser Region sinnvoller, den Wärmehaushalt für das B/C-Gebiet, das in der Größenordnung der 'Cloud Cluster' Ereignisse liegt, zu betrachten, allerdings ist der inzwischen vorhandene Datensatz dazu noch zu unvollständig. Trotzdem erscheint es versuchenswert, eine Wärmebilanz für das C-Gebiet aufzustellen, da ein relativ dichtes Stationsnetz vorhanden ist.

Dieser Arbeit liegen die Messungen der Forschungsschiffe 'Meteor', 'Planet' und 'Quadra', die Daten der Verankerungen F1 und E3 und die der meteorologischen Boje, die sich 300 m entfernt von FS 'Meteor' befand, zu Grunde. Ermunternd bezüglich der Aufstellung einer Wärmebilanz wirkten weiterhin die guten Messungen der meteorologischen Parameter, wobei allerdings der latente und sensible Wärmefluß nur auf Grund der Profilmessungen der meteorologischen Boje bestimmt werden konnte.

Das Meßgebiet liegt in der äquatorialen Gegenstromregion, wo also relativ große Strömungsgeschwindigkeiten in der Deck-

schicht von etwa $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ herrschen. Somit wird wohl die Advektion eine wichtige Rolle spielen, d.h. es ist nur eine dreidimensionale Betrachtungsweise des Wärmehaushalts sinnvoll. Die mittleren Oberflächentemperaturen während der drei Meßphasen ergeben allerdings nur einen recht geringen horizontalen Temperaturgradienten, der ansatzweise erkennen läßt, daß die mittlere Strömung aus Süd-Westen kühleres Wasser mit sich bringt.

2. Der verwendete Datensatz

Dieser Arbeit liegen sowohl Temperatur- und Salzgehaltsprofile als auch Strömungsmessungen, die als Zeitreihe vorliegen, zu Grunde. Weiterhin werden die Ein- und Ausstrahlungsgrößen, die latenten und sensiblen Wärmeflüsse, die Niederschlagsraten und die Bewölkungsverhältnisse verwendet. In Tabelle 1 findet man eine Zusammenstellung der benutzten Daten. Sie wurden größtenteils im GATE B/C-Gebiet gewonnen, das sich von 7° N bis 10° N und von 22° W bis 25° W erstreckte (Abb. 1). Das GATE-Experiment bestand aus drei verschiedenen Meßphasen, wobei die erste vom 28.6.74 bis zum 17.7.74, die zweite vom 28.7.74 bis zum 16.8.74 und die dritte vom 30.8.74 bis zum 20.9.74 reicht.

Die stündlichen Multisondenprofile stammen von FS 'Meteor', das sich während der ersten beiden Phasen auf Station 4 und während der dritten Phase auf Position 1 befand. Auf WFS 'Planet', das nur während der dritten Phase auf Station 27 teilnahm, wurden die Profile alle drei Stunden mit Hilfe der Bathysonde gewonnen. Weiterhin werden die CTD-Daten des kanadischen Schiffes 'Quadra' verwendet, das sich während der ersten beiden Phasen auf Position 3A und während der dritten Phase auf Station 3B befand.

Die Strömungsdaten stammen von der Verankerung F1, die auf der Position $8^{\circ} 49,9'$ N, $22^{\circ} 52,6'$ W ausgelegt war, und der Verankerung E3, die auf der Position $8^{\circ} 41,2'$ N, $23^{\circ} 8,7'$ W lag (Abb. 2 und 3). Verwendet wurden die Daten der VACM-Strömungsmesser in 7m bzw. in 7,6m und in 21,4m Tiefe, wobei das Abfrageintervall 3,75 Minuten bzw. bei der E3-Verankerung 7,5 Minuten betrug (WMO, 1975). Diese Daten liegen als Zeitreihe vor, die im Fall der F1-Verankerung am 30.8.74 um 0:00 GMT beginnt und am 18.9.74 um 8:45 GMT endet. Die Zeitreihe der E3-Verankerung dauert vom 20.8.74 0:00 GMT bis zum 13.9.74 0:00 GMT.

Außerdem wurden die Strahlungsmessungen von FS 'Meteor' und FS 'Quadra' verwendet, die während aller drei Meßphasen gewonnen wurden. Die Profilmessungen zur Bestimmung der latenten und sensiblen Wärmeflüsse stammen von der meteorologischen Boje, die etwa 300 m von FS 'Meteor' entfernt war.

Die verwendeten Niederschlagsraten wurden von allen B/C-Scale-Schiffen außer dem französischen Schiff 'Bidassoa' gemessen, und die Daten erstrecken sich lückenlos über alle drei Phasen (Seguin et al., 1976). Weiterhin wurden die Niederschlagsbilder, die mit Hilfe der Radargeräte der B/C-Scale-Schiffe gewonnen wurden, ausgewertet (Arkell et al., 1977). Diese Bilder liegen über alle drei Meßphasen in Abständen von drei Stunden vor, allerdings befinden sich mehrere große Lücken in dieser Zeitreihe.

Die Aufnahmen des amerikanischen Satelliten SMS 1 wurden bezüglich der Bewölkungsverteilung über dem Meßgebiet ausgewertet.

Tabelle 1

Der verwendete Datensatz

1. Ozeanographische Parameter

Meßgröße	Meßplattform	Meßgerät	Meßintervall	Meßart
Temperatur	Meteor	Multisonde	1 h	Profil
	Planet	Bathysonde	3 h	Profil
	Quadra	CTD-Sonde	1 h	Profil
Leitfähigkeit	Meteor	Multisonde	1 h	Profil
	Planet	Bathysonde	3 h	Profil
	Quadra	CTD-Sonde	1 h	Profil
Strömung	F1	VACM	3,75min	Zeitreihe
	E3	VACM	7,5 min	Zeitreihe

2. Meteorologische Parameter

Meßgröße	Meßplattform	Meßgerät	Meßintervall	Meßart
Niederschlag	alle B/C-Schiffe	Radar	3 h	Zeitreihe
	alle B/C-Schiffe	Niederschlagsauf-fänger	1 h	Zeitreihe
Bewölkung	SMS1	Kamera	1 h	Zeitreihe

Meßgröße	Meßplattform	Meßgerät	Meßintervall	Meßart
kurzwellig- e Ein- strahlung	Meteor	Pyranometer	1 h	Zeitreihe
	Quadra	Pyranometer	1 h	Zeitreihe
kurzwellig- e Aus- strahlung	Meteor	Pyranometer	1 h	Zeitreihe
	Quadra	Pyranometer	1 h	Zeitreihe
gesamte Einstrah- lung	Meteor	Pyradiometer	1 h	Zeitreihe
	Quadra	Pyradiometer	1 h	Zeitreihe
langwellig- e Ein- strahlung	Meteor	Pyrgeometer	1 h	Zeitreihe
	Quadra	Pyrgeometer	1 h	Zeitreihe
latenter Wärmefluß	meteorolo- gische Boje	Berechnung aus Profil- messung	1 h	Zeitreihe
sensibler Wärmefluß	meteorolo- gische Boje	Berechnung aus Profil- messung	1 h	Zeitreihe

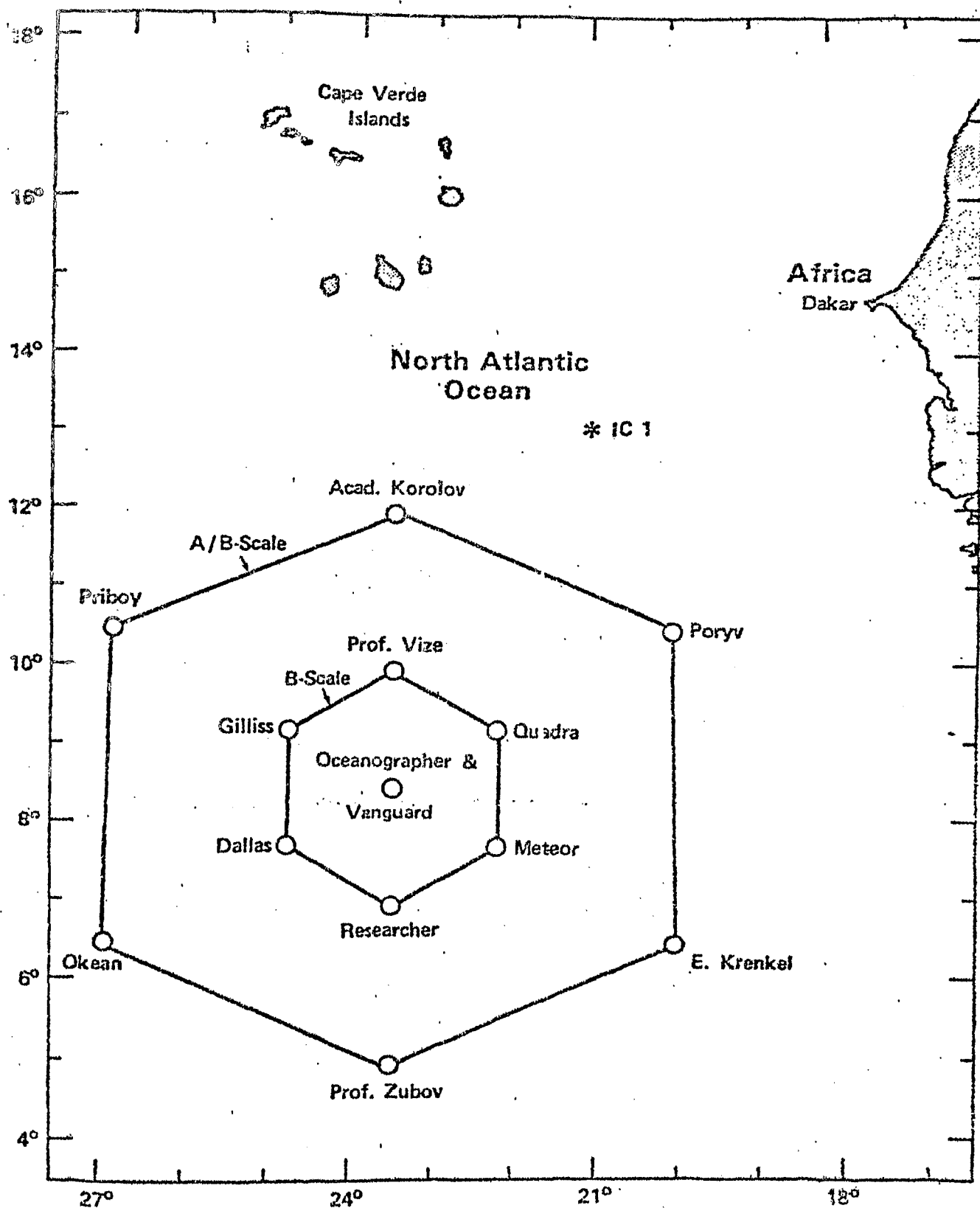


Abb. 1a Das GATE B/C-Gebiet während
der 1. Meßphase
(Seguin et al., 1976)

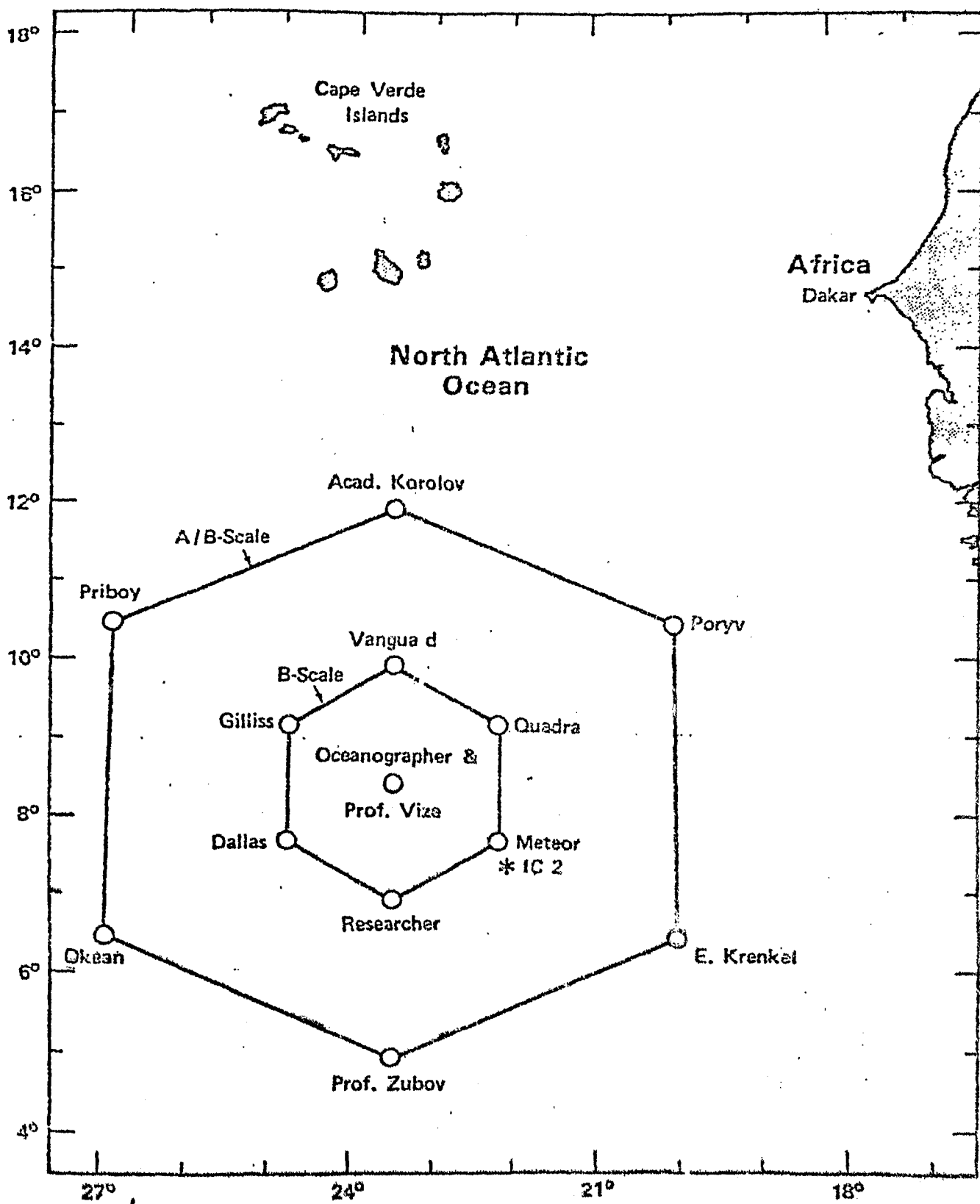


Abb. 1b Das GATE B/C-Gebiet während
der 2. Meßphase
(Seguin et al., 1976)

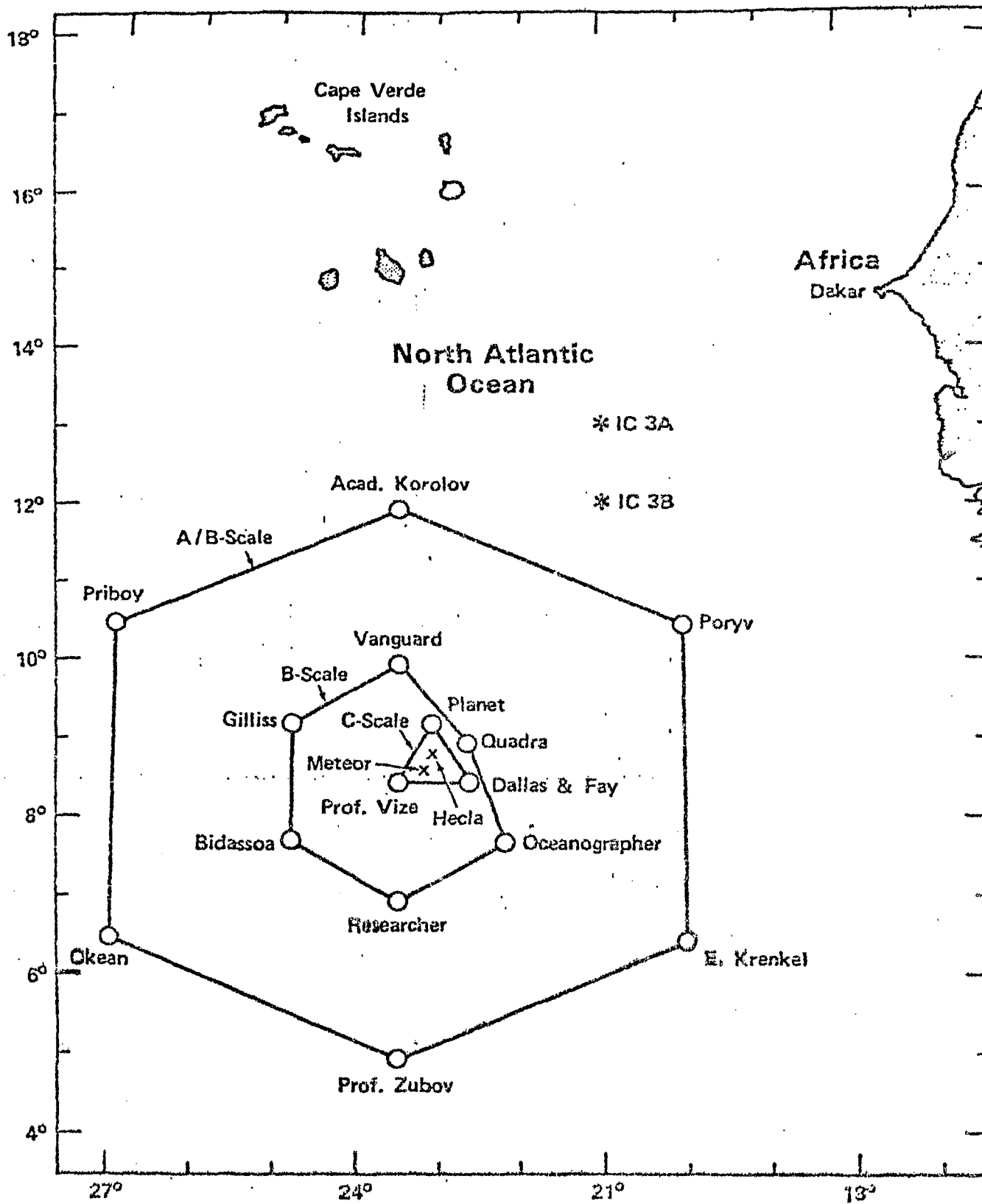


Abb. 1c Das GATE B/C -Gebiet während
der 3. Meßphase
(Seguin et al., 1976)

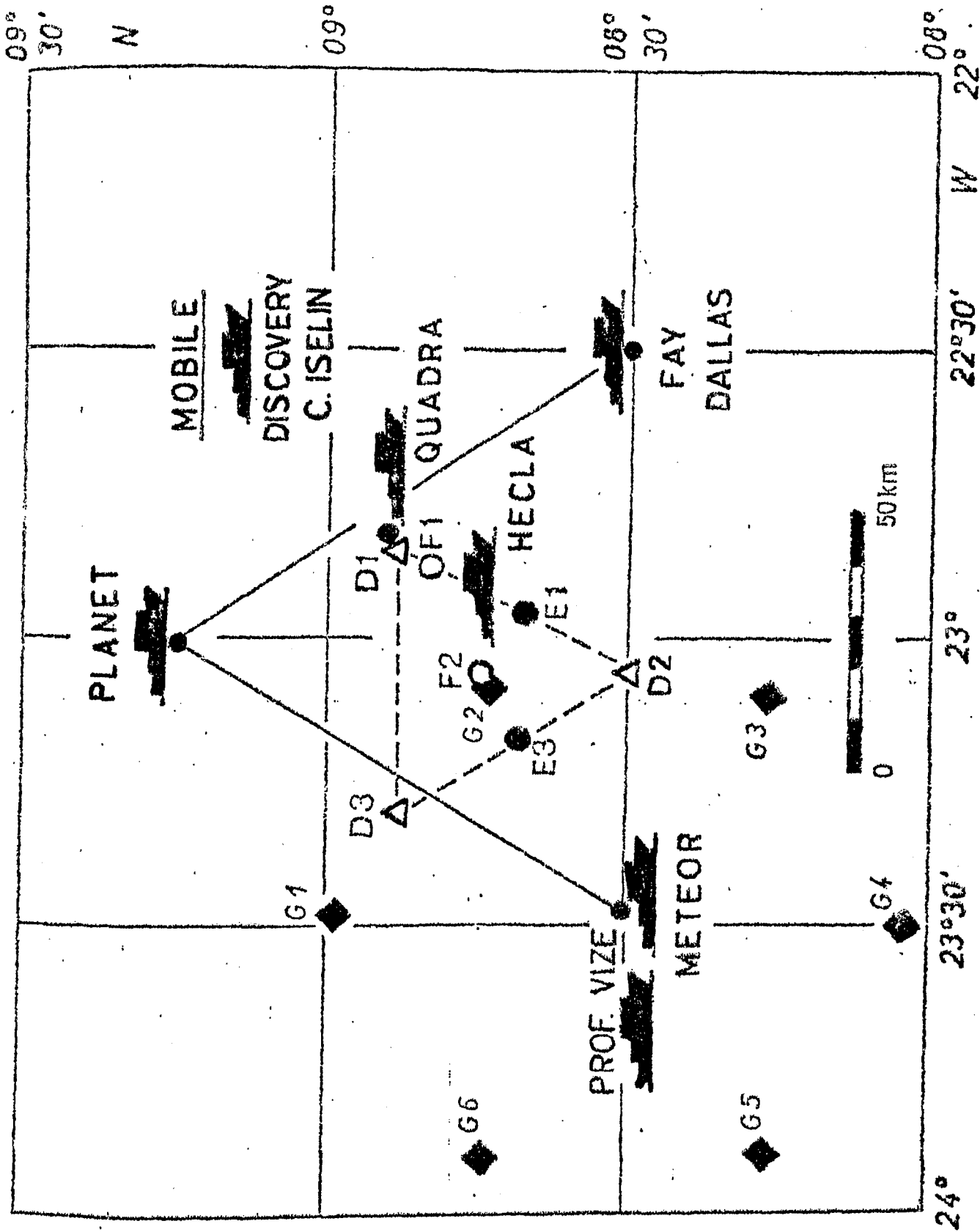


Abb. 1d Das GATE C-Gebiet (Brockmann et al., 1975)

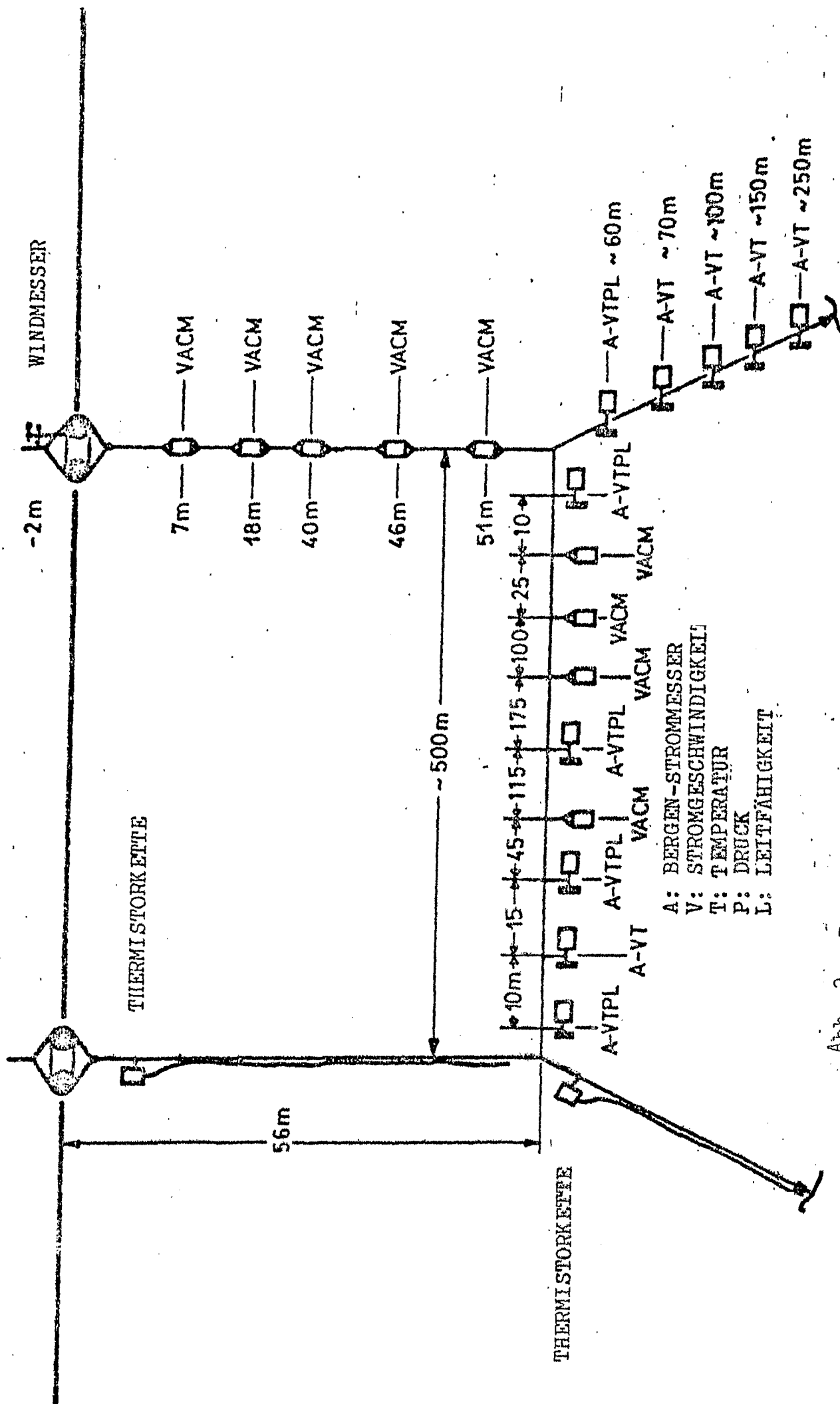


Abb. 2 Darstellung der F1-Verankerung
(Brockmann et al., 1975)

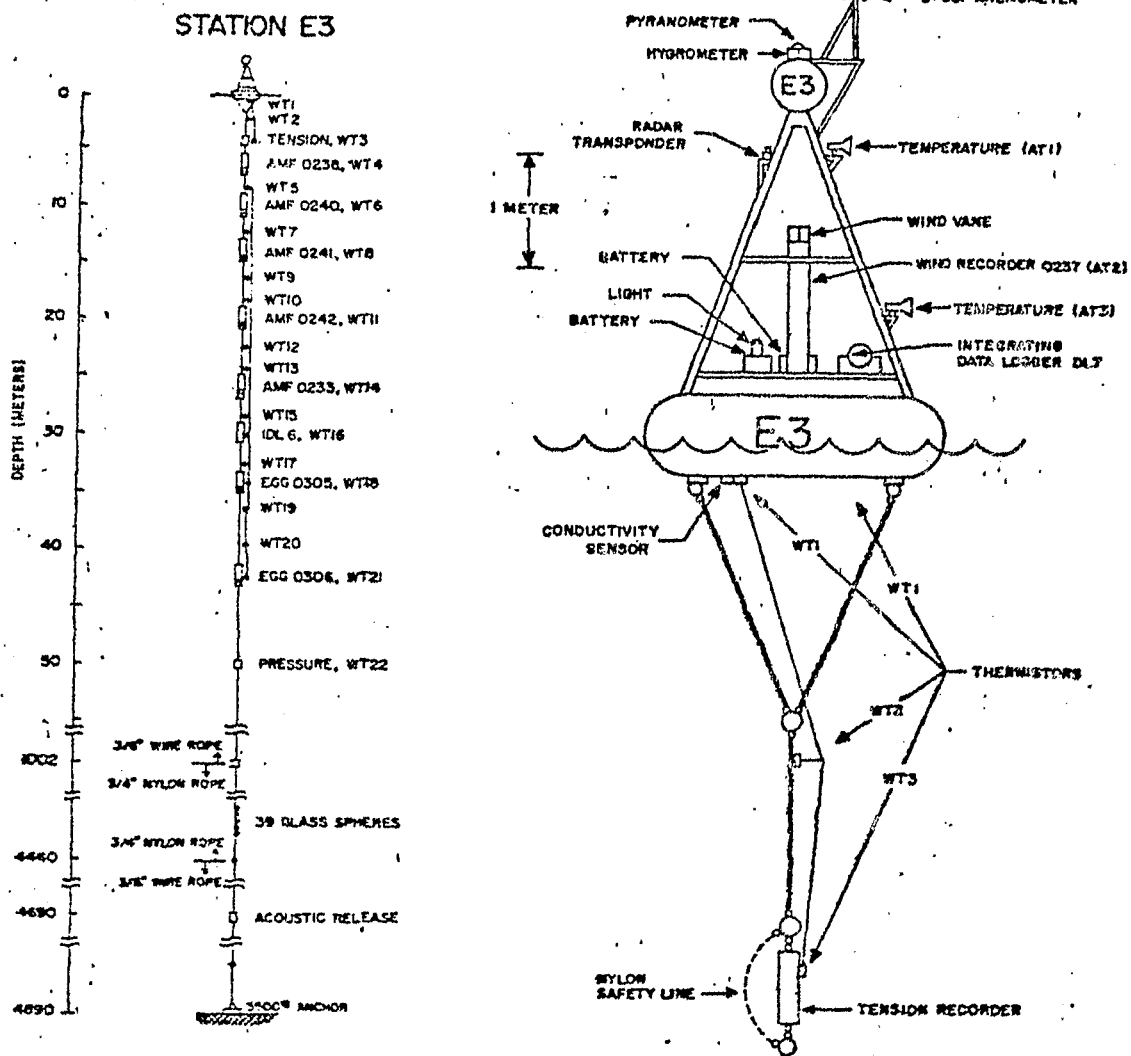


Abb.3

Darstellung der E3-Verankerung
(WMO, 1975)

3. Die Genauigkeit der Daten

a) CTD-Profilmessungen

Bei der Druckbestimmung mit den CTD-Sonden beträgt die vom Hersteller angegebene Standardabweichung $\pm 0.25\%$ vom Meßbereich, der bei der Multisonde auf FS 'Meteor' von 0 bis 8000 dbar und bei der Bathysonde auf FS 'Planet' von 0 bis 800 dbar reicht. Somit erhält man für die Multisonde eine absolute Genauigkeit von ± 20 dbar für den gesamten Meßbereich, während sie für die Oberflächennähe \pm einige dbar beträgt. Für die Bathysonde erhält man eine absolute Genauigkeit von ± 2 dbar für den gesamten Meßbereich und ± 0.5 dbar für den Oberflächenbereich (Peters, 1976).

Bei den Temperaturmessungen mit den CTD-Sonden ergibt sich laut Herstellerangaben ein absoluter Fehler von $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ bei einer Auflösung von 0.01°C . Der absolute Fehler der Leitfähigkeitsmessungen beträgt bei der Multisonde $\pm 0.01 \text{ mmho}\cdot\text{cm}^{-1}$ und bei der Bathysonde $\pm 0.012 \text{ mmho}\cdot\text{cm}^{-1}$. Damit ergibt sich für den Salzgehalt, der mit der von Fofonoff et al. (1974) entwickelten Formel berechnet wurde, ein Fehler von $\pm 0.03^{\circ}/\text{oo}$.

Bei der Berechnung von σ_t mit Hilfe einer ebenfalls von Fofonoff et al. (1974) entwickelten Formel erhalten wir auf Grund der Fehler in den Temperatur- und Salzgehaltswerten eine Standardabweichung von $\pm 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Peters, 1976).

b) VACM-Messungen

Bei der Bestimmung der Strömungsrichtung wurden vom Hersteller Abweichungen von maximal $\pm 2.8^{\circ}$ angegeben, und die relative Genauigkeit der Strömungskomponenten beträgt etwa 3%. Die Thermistoren in den VACM's weisen eine Standardabweichung von $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ auf (Käse et al., 1978).

c) Meteorologische Daten

Sowohl bei der langwelligen und kurzwelligen Ausstrahlung als auch bei dem berechneten latenten und sensiblen Wärmefluß ergibt sich ein prozentualer Fehler von

$\pm 20\%$ pro Meßwert. Der Fehler der kurzwelligen und langwelligen Einstrahlung beträgt $\pm 5\%$ auf der Tagessumme (Cornus, 1977).

In Tabelle 2 sind die absoluten bzw. relativen Fehler der Daten zusammengefaßt.

Tabelle 2

Absolute bzw. relative Fehler der Meßgrößen

1. Ozeanographische Parameter

Meßgröße	Multisonde Meteor	Bathysonde Planet	VACM F1-Verankerung
Oberflächennähe	\pm einige dbar	\pm 0.5 dbar	-
Druck gesamter Meßbereich	\pm 20 dbar	\pm 2 dbar	-
Temperatur	\pm 0.01°C	\pm 0.02°C	\pm 0.015°C
Salzgehalt	\pm 0.03‰	\pm 0.03‰	-
σ_t	\pm 0.025	\pm 0.03	-
Stromrichtung	-	-	\pm 2.8°
Strombetrag	-	-	\pm 2 cm·s ⁻¹

2. Meteorologische Parameter

Meßgröße	relativer Fehler
kurz- und langwellige Einstrahlung	\pm 5% auf der Tages- summe
kurz- und langwellige Ausstrahlung	\pm 20% vom Meß- wert
latenter und sensibler Wärmefluß	\pm 20% vom Meß- wert

4. Allgemeine hydrographische Beschreibung des Meßgebietes

Das GATE B/C-Scale-Gebiet, das sich von 7°N bis 10°N erstreckte, lag in der von schwachen Winden gekennzeichneten Kalmenzone, die im Mittel von 5°N bis 10°N reicht. In dieser Region verläuft der ostwärts gerichtete äquatoriale Gegenstrom, der den westwärts gerichteten Nordäquatorialstrom vom Südäquatorialstrom trennt. Alle drei sind geostrophische Ströme, die auf Grund der windbedingten äquatorialen Konvergenz in etwa 5°N und Divergenzen in etwa 10°N und 0° entstehen (Dietrich et al.). Die Divergenzzonen zeichnen sich im allgemeinen durch verhältnismäßig niedrige Oberflächentemperaturen aus. Allerdings kommt an der Nordflanke des äquatorialen Gegenstroms das kalte Auftriebswasser meist nicht bis an die Oberfläche, da eine scharfe Dichtesprungschicht, die in Folge von hohen Niederschlägen in der Kalmenzone entsteht, als Sperrschicht wirkt. Die mittleren Verteilungen der Oberflächentemperatur während der drei Meßphasen sind in Abb. 4 dargestellt. Man kann deutlich erkennen, daß der horizontale Temperaturgradient bis zur dritten Meßphase hin wesentlich abnimmt. Ansatzweise sieht man, daß eine mittlere Strömung aus Westen kühleres Wasser mit sich bringt. In Abb. 5 sind die mittleren Profile der Temperatur, des Temperaturgradienten, des Salzgehalts und σ_t von FS 'Meteor' während der dritten Meßphase zusammengestellt. Auf Grund eines Einschubs von salzreichen subtropischen Wassermassen unter die durch Niederschläge ausgesüßte Deckschicht entsteht ein Salzgehaltsmaximum im oberen Teil der Dichtesprungschicht, das für diese Region typisch ist. (Dietrich et al., 1975).

Während der Meßdauer setzt der äquatoriale Gegenstrom im Mittel in Richtung 78° , und seine mittlere Geschwindigkeit beträgt $45\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ in 7m Tiefe. Auf Grund dieser starken Strömung spielt die Advektion trotz verhältnismäßig niedrigen horizontalen Temperaturgradienten in diesem Bereich bezüglich des Wärmehaushalts der Deckschicht eine wichtige Rolle.

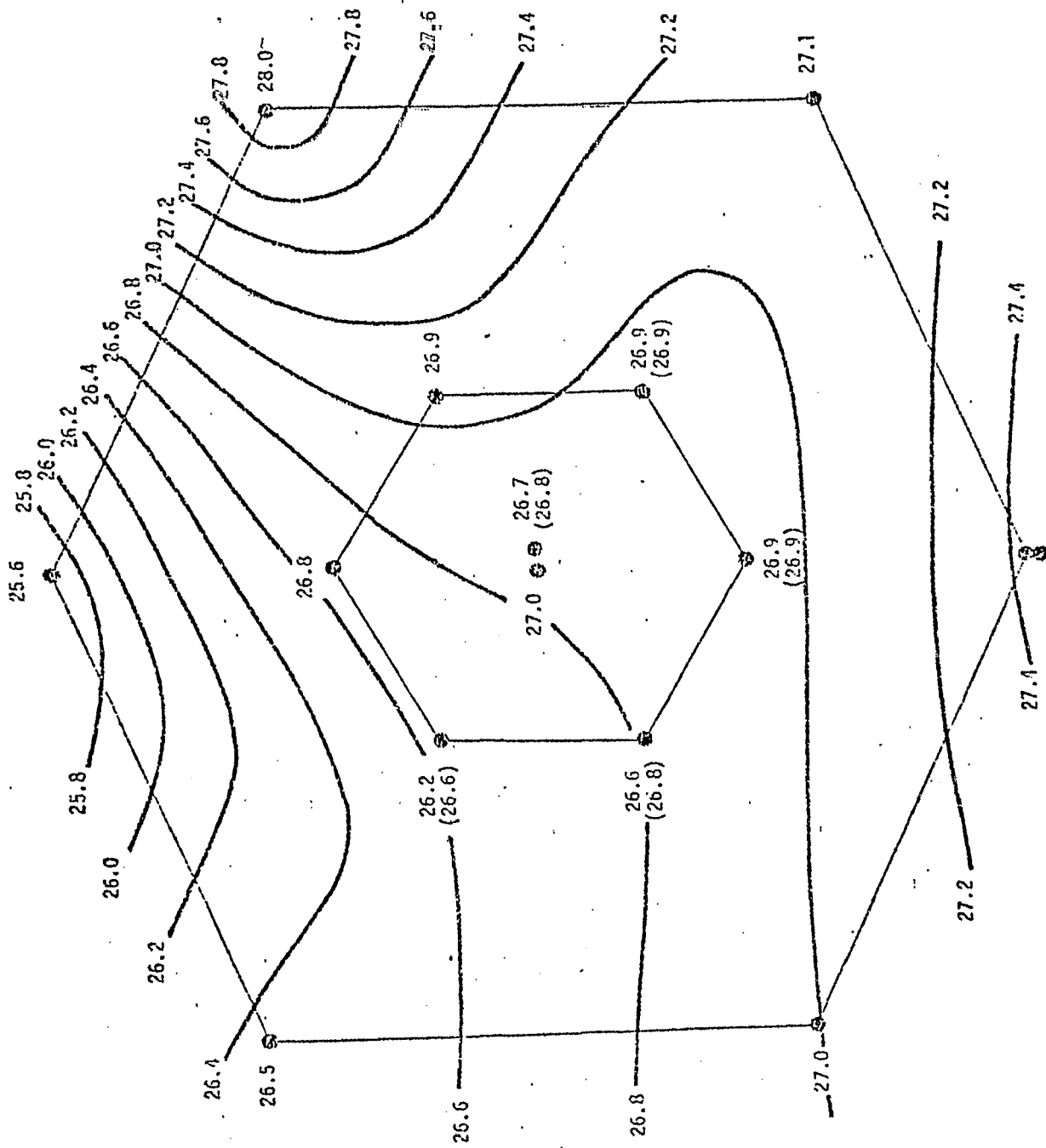


Abb. 4a Die mittleren Oberflächentemperaturen während der 1. Meßphase (Seguin et al., 1978)

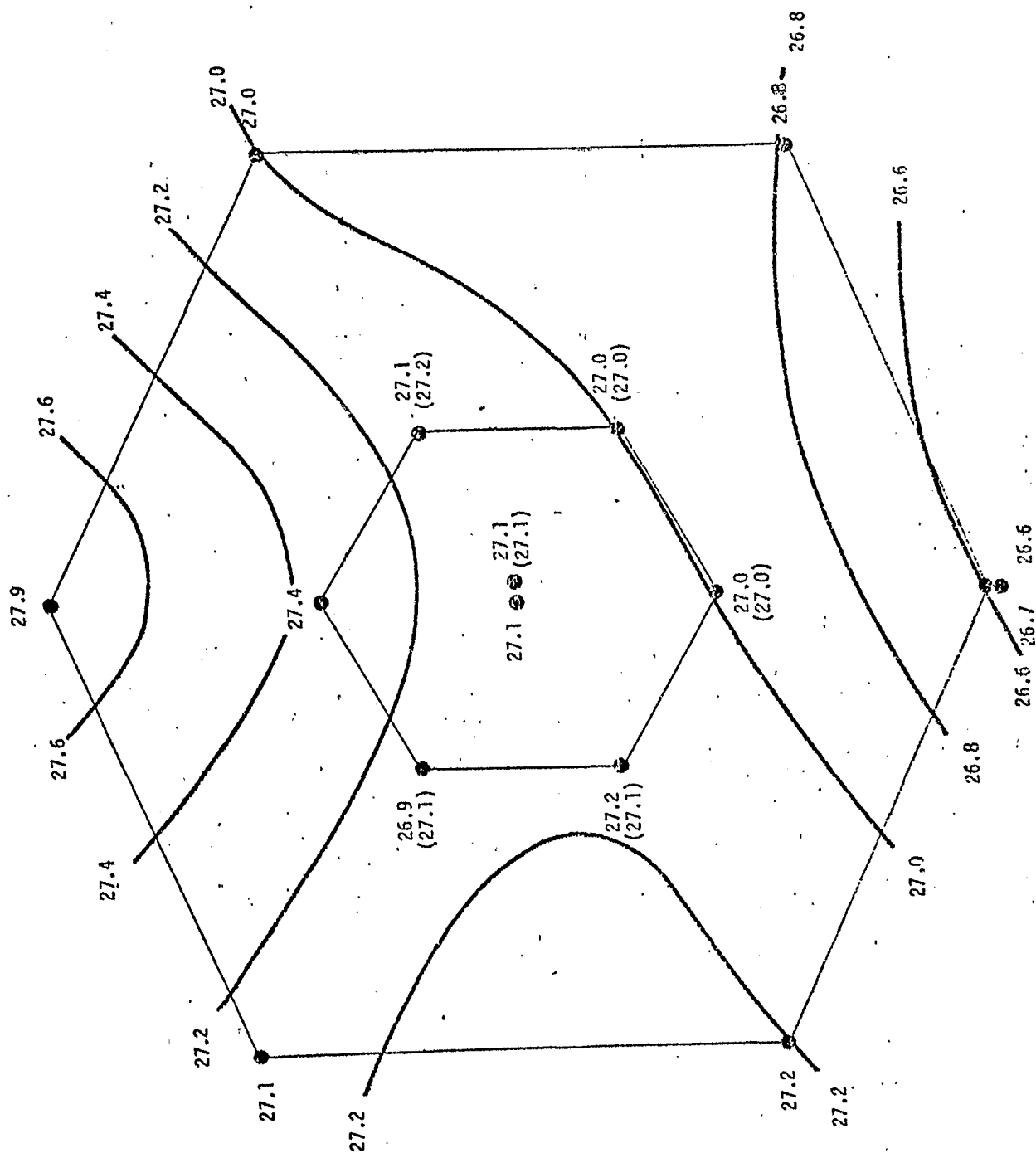


Abb. 4b. Die mittleren Oberflächentemperaturen während der 2. Meßphase (Seguin et al., 1978)

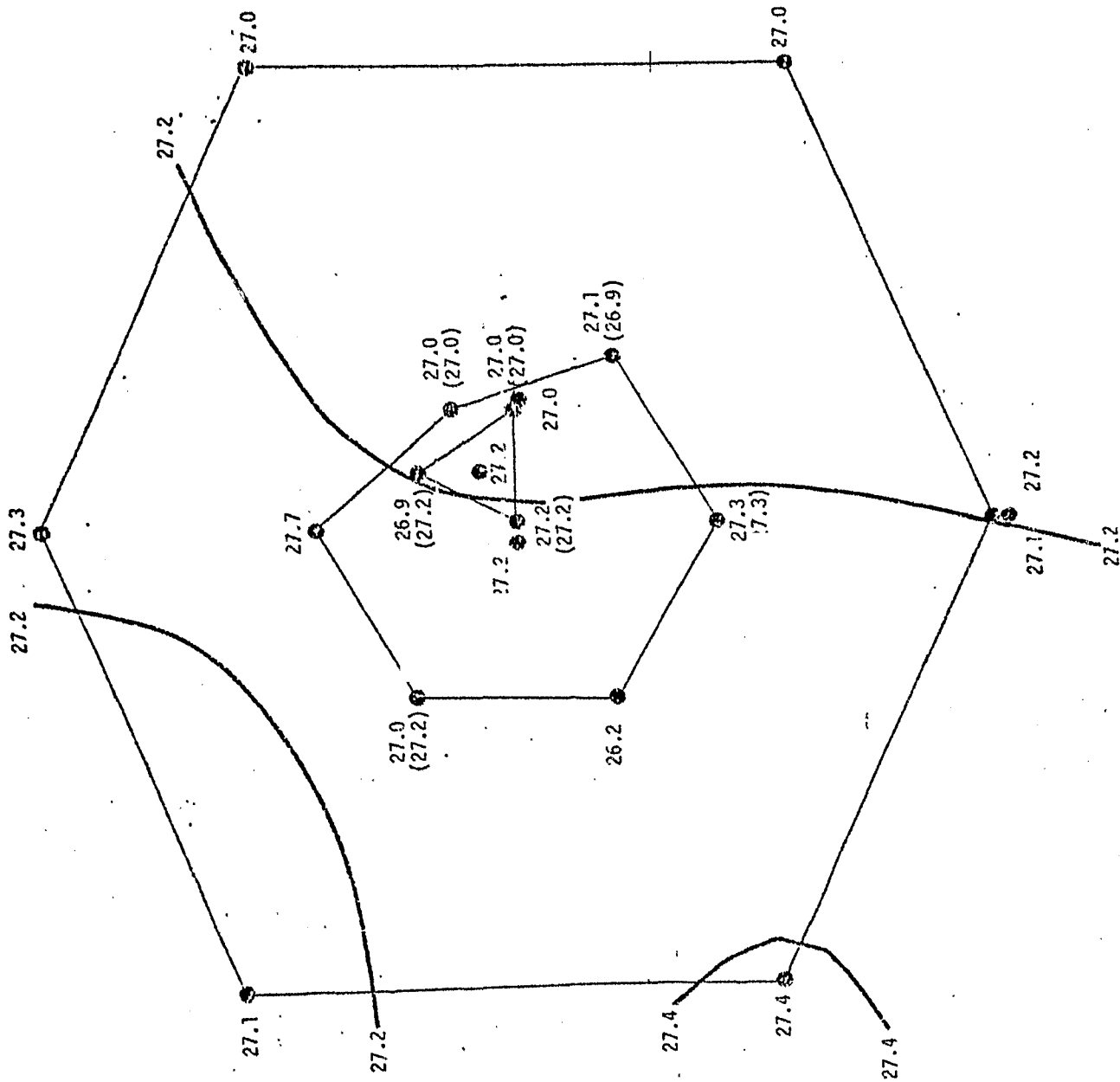


Abb. 4c Die mittleren Oberflächentemperaturen (Seguin et al., 1978) während der 3. Meßphase

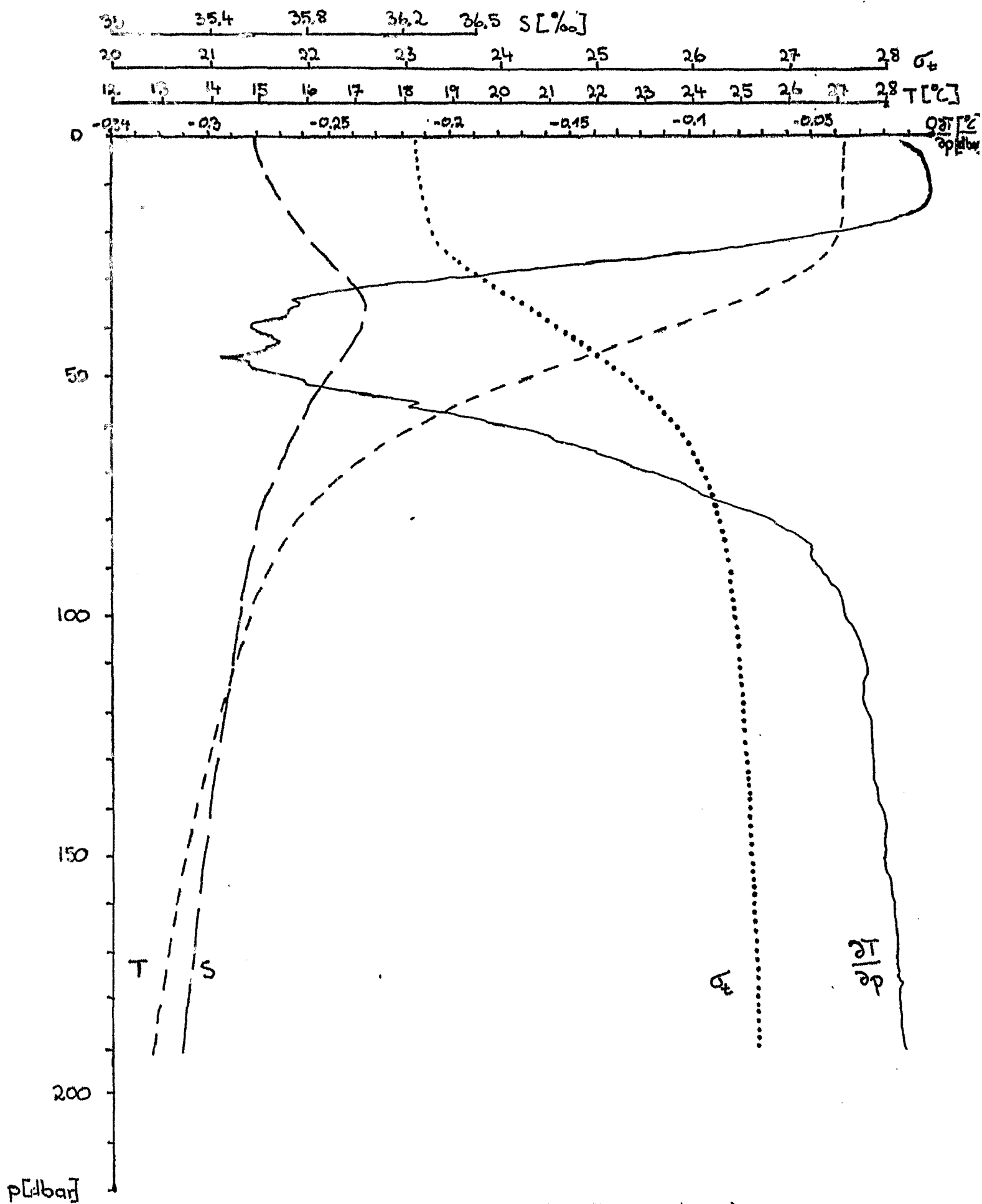


Abb. 5 Die mittleren Profile der Temperatur, des Salzgehalts und σ

5. Die Wärmebilanzgleichung

Aus der einer Masse m zugeführten Wärmemenge Q , die eine Änderung der mittleren Temperatur ΔT in der Zeit dt bewirkt und folgendermaßen definiert ist

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \bar{\rho} \cdot F \cdot D \cdot c_p \cdot \left(\frac{1}{D} \int_0^D T_{t+dt}(z) dz - \frac{1}{D} \int_0^D T_t(z) dz \right) \quad (1),$$

leiten wir den Wärmeinhalt einer Wassersäule mit dem Querschnitt 1 cm^2 und der Länge D ab.

$$H = \bar{\rho} c_p \int_0^D T(z) dz \quad (2)$$

Dabei bedeuten

- Q Wärmemenge in cal
- m Masse der Wassersäule
- F Querschnitt der Wassersäule
- D Länge der Wassersäule
- $\bar{\rho}$ mittlere Dichte der Wassersäule
- H Wärmeinhalt in cal/cm^2
- c_p spezifische Wärme bei konstantem Druck

$T_t(z)$ Temperaturverteilung mit der Tiefe zum Zeitpunkt t

Die Änderung der Wärmemenge in einer Wassersäule wird durch die Terme in der Wärmehaushaltsgleichung bestimmt, die im allgemeinen folgende Form annimmt

$$Q_g = Q_s + Q_{EA} + Q_R + Q_v + Q_k + Q_T \quad (3)$$

Dabei bedeuten

- Q_g Gesamtwärmebilanz
- Q_s Globalstrahlung
- Q_{EA} effektive Ausstrahlung, d.h. langwellige Ausstrahlung der Meeresoberfläche minus der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung
- Q_R kurzwellige, reflektierte Strahlung und kurzwellige Rückstrahlung
- Q_v latenter Wärmestrom
- Q_k sensibler Wärmestrom
- Q_T Advektion, Vertikalkonvektion und Vermischung

Da der Energiegewinn durch Reibungswärme, chemische und biologische Prozesse, Wärmezufuhr aus dem Erdinneren und den Zerfall von radioaktiven Stoffen im Meerwasser höchstens 2/1000 der eingestrahlten Energie beträgt, werden diese Vorgänge in Gleichung (3) vernachlässigt (Dietrich et al., 1975).

Sowohl die Globalstrahlung, d.h. die direkte und diffuse Sonneneinstrahlung, als auch die kurzwellige Rückstrahlung wurden mit einem Pyranometer gemessen, während der latente und sensible Wärmestrom auf Grund von Profilmessungen berechnet wurde. Die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung wurde mit einem Pyrgeometer gemessen und die Ausstrahlung der Meeresoberfläche wird mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes bestimmt.

Zur genaueren Bestimmung des Terms Q_T gehen wir von der Wärmeleitungsgleichung aus, die bei vernachlässigbarer molekularer Diffusion lautet

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla \cdot \rho c_p \vec{w} T = 0 \quad (4)$$

Dabei bedeuten

\vec{w} Geschwindigkeitsvektor

$$\nabla \triangleq \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \quad \text{Differentialoperator}$$

In diesem Fall betrachtet man die Temperatur also als eine konservative Größe. Zerlegt man die Temperatur und die Geschwindigkeit nach Reynolds in einen mittleren und einen turbulenten Anteil, d.h. $T = \bar{T} + T'$ und $\vec{w} = \bar{\vec{w}} + \vec{w}'$ und mittelt die Gleichung über ein genügend langes Zeitintervall, um eine Aussage über den mittleren Zustand zu bekommen, so ergibt sich

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho c_p \bar{T} + \nabla \cdot \rho c_p \bar{\vec{w}} \bar{T} + \nabla \cdot \rho c_p \overline{\vec{w}' T'} = 0 \quad (5)$$

Definiert man einen Austauschkoeffizienten in folgender Weise (z.B. Krauss, 1973)

$$\rho c_p \overline{\vec{w}' T'} = - A_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (6)$$

und integriert die Gleichung (5) von 0 bis zur Tiefe D und zerlegt sie in ihre horizontalen und vertikalen Teile, so erhält man

$$\int_0^D \frac{\partial}{\partial t} \rho c_p \bar{T} dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^D \rho c_p \bar{u} \bar{T} dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^D \rho c_p \bar{v} \bar{T} dz + \int_0^D \frac{\partial}{\partial z} \rho c_p \bar{w} \bar{T} dz = A_h \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^D \bar{T} dz + A_h \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^D \bar{T} dz + A_v \int_0^D \frac{\partial^2}{\partial z^2} \bar{T} dz \quad (7)$$

Nimmt man weiterhin an, daß \bar{u} und \bar{v} bezüglich der Tiefe konstant sind und setzt man weiterhin ein horizontal homogenes Strömungsfeld voraus, so ergibt sich aus Gleichung (7)

mit Hilfe der Gleichung (2), wobei D weiterhin konstant gesetzt wird (siehe Kapitel 6.2.2.)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + s c_p w \overline{T} \Big|_D \\ &= A_h \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^D \overline{T} dz + A_h \frac{\partial^2}{\partial y^2} \int_0^D \overline{T} dz + A_v \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \Big|_D - A_v \frac{\partial \overline{T}}{\partial z} \Big|_0 \end{aligned} \quad (8)$$

Auf der linken Seite der Gleichung (8) steht zuerst die lokale zeitliche Änderung des Wärmeinhalts, dann folgen die beiden horizontalen Advektionsterme und zuletzt steht der vertikale Advektionsterm. Auf der rechten Seite stehen am Anfang die beiden Terme der horizontalen turbulenten Wärmeleitung. Die beiden letzten Glieder der Gleichung (8) beinhalten die vertikale turbulente Diffusion einerseits durch die Integrationstiefe D und andererseits durch die Meeresoberfläche.

Den turbulenten Wärmefluß durch die Meeresoberfläche bezeichnet man in diesem Fall als den Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre Q_N , der sich folgendermaßen zusammensetzt.

$$Q_N = Q_s + Q_{EA} + Q_R + Q_v + Q_k \quad (9)$$

6. Erläuterung der Wärmebilanzterme

In diesem Kapitel soll dargestellt werden, welchen Einfluß die einzelnen Terme der Gleichung (3) auf den Wärmehaushalt haben. Ihre Größenordnung soll bestimmt werden, und Überlegungen für gerechtfertigte Vernachlässigungen bezüglich des Terms Q_T sollen angestellt werden. Da in dieser Arbeit längerfristige Veränderungen betrachtet werden sollen, werden die ozeanographischen Daten über 24 Stunden gemittelt und die meteorologischen über den gleichen Zeitraum aufaddiert, damit der Tagesgang und der Einfluß der eintägigen Gezeiten weitgehend eliminiert wird. Nur für einen Zeitraum von fünf Tagen, in denen die Einstrahlung besonders stark ansteigt und wieder abfällt, werden die stündlichen Werte betrachtet, um Aussagen über kurzfristigere Abläufe zu erhalten (Kapitel 7.1.3).

6.1. Der Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre

Der Netto-Wärmeaustausch durch die Meeresoberfläche wird nach Gleichung (9) berechnet aus der Globalstrahlung, der effektiven Ausstrahlung, der kurzwelligen, nach oben gerichteten Strahlung und der latenten und sensiblen Wärme flüsse. Sowohl die direkte und diffuse Sonneneinstrahlung als auch die kurzwellige Rückstrahlung wurde von allen Schiffen mit einem Pyranometer gemessen, das die Temperaturdifferenz zwischen einer bestrahlten Fläche und einem nicht bestrahlten Eichkörper mißt. Die atmosphärische Gegenstrahlung wurde mit einem Pyrgeometer gemessen, das verschiedene Empfängerflächen mit unterschiedlicher Absorptionsfähigkeit für langwellige Strahlung besitzt. Nur auf dem kanadischen Forschungsschiff 'Quadra' wurde ebenfalls mit einem Pyrgeometer die aufwärts gerichtete langwellige Strahlung gemessen. Ansonsten wurde die langwellige Ausstrahlung der Meeresoberfläche mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet, das lautet

$$Q_A = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_w^4$$

Dabei bedeuten

- Q_A langwellige Ausstrahlung der Meeresoberfläche
- ϵ Emissionsvermögen
($\epsilon = 0.97$ da Meeresoberfläche kein Schwarzer Strahler ist)
- σ Stefan-Boltzmann-Konstante
- T_w Oberflächentemperatur des Wassers in $^{\circ}\text{K}$

Außerdem wurde auf den Forschungsschiffen 'Meteor', 'Planet' und 'Quadra' die abwärts gerichtete kurz- und langwellige Strahlung mit einem Radiometer gemessen.

Der latente und sensible Wärmestrom wird mit Hilfe folgender Formeln berechnet

$$Q_v = - \ell \cdot \epsilon \cdot \frac{\sigma}{\ln \frac{T}{T_{0,v}} + 4_m \left(\frac{T}{L} \right)} \cdot \frac{\sigma}{\ln \frac{T}{T_{0,Q_v}} + 4_{Q_v} \left(\frac{T}{L} \right)} \quad u_{10} \Delta \theta_{10}$$

$$Q_k = - c_{\text{up}} \cdot \epsilon \cdot \frac{\sigma}{\ln \frac{T}{T_{0,k}} + 4_m \left(\frac{T}{L} \right)} \cdot \frac{\sigma}{\ln \frac{T}{T_{0,Q_k}} + 4_{Q_k} \left(\frac{T}{L} \right)} \quad u_{10} \Delta \theta_{10}$$

Dabei bedeuten

ρ_L Dichte der Luft

c_{Lp} spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck

κ Karman-Konstante

ℓ spezifische Verdunstungswärme

Θ potentielle Temperatur

q spezifische Feuchte

L Monin Obuchow Länge

$$\eta_i = \int_{z_{0i}/L}^{z/L} \frac{\phi_i(z/L) - 1}{z/L} dz$$

ϕ_i Stabilitätsfunktionen für Wind- und Temperaturprofile

$z_{0u}, z_{0\theta}$ Integrationskonstanten für Wind- und Temperaturprofile

u_{10} Windgeschwindigkeit in 10m Höhe

Die Berechnungen des latenten und sensiblen Wärmeflusses basieren auf den Messungen der meteorologischen Boje, die 300m entfernt von FS 'Meteor' lag. Bei anderen Schiffen waren oftmals die Messungen zu schlecht, um eine Berechnung dieser turbulenten Wärmeflüsse als sinnvoll erscheinen zu lassen.

Mit Hilfe dieser gemessenen und berechneten Größen wird der Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre bestimmt. Um ihre Größenordnung widerzuspiegeln, sind die einzelnen Terme in Abb. 6 dargestellt.

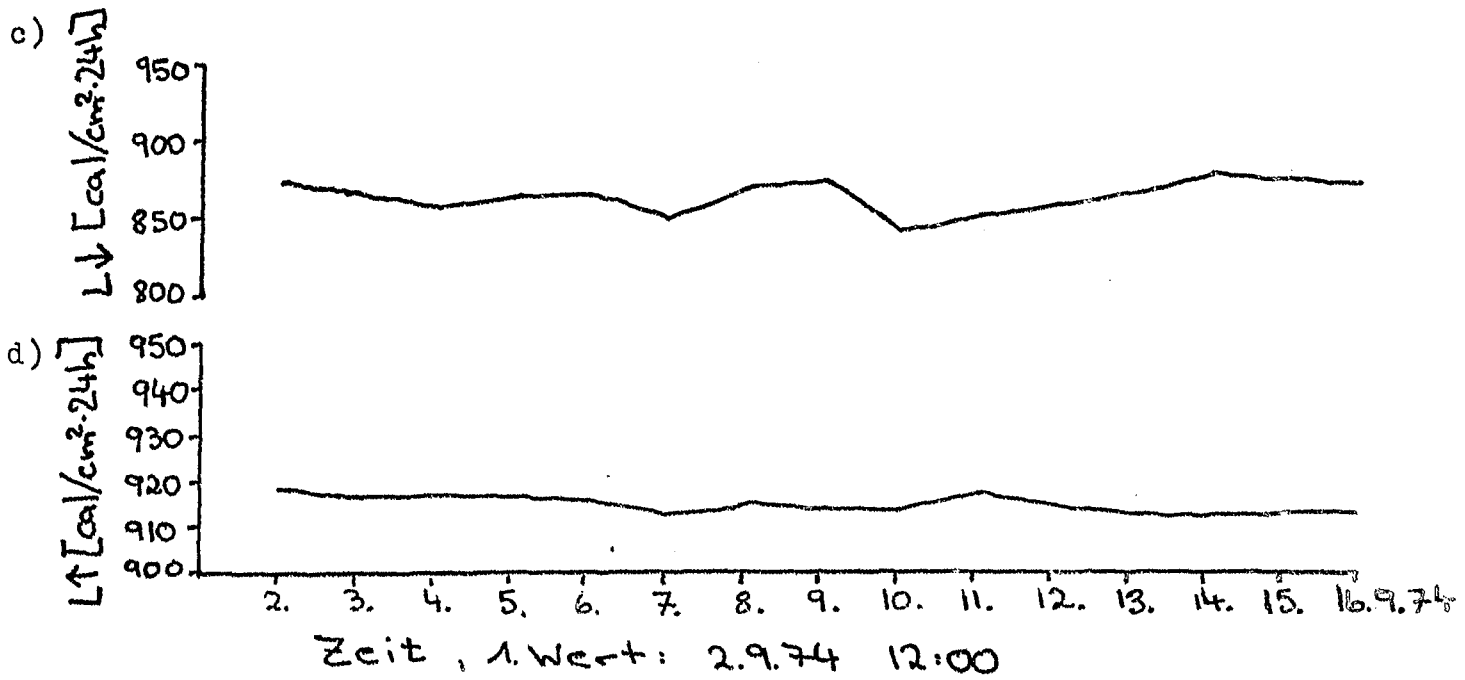
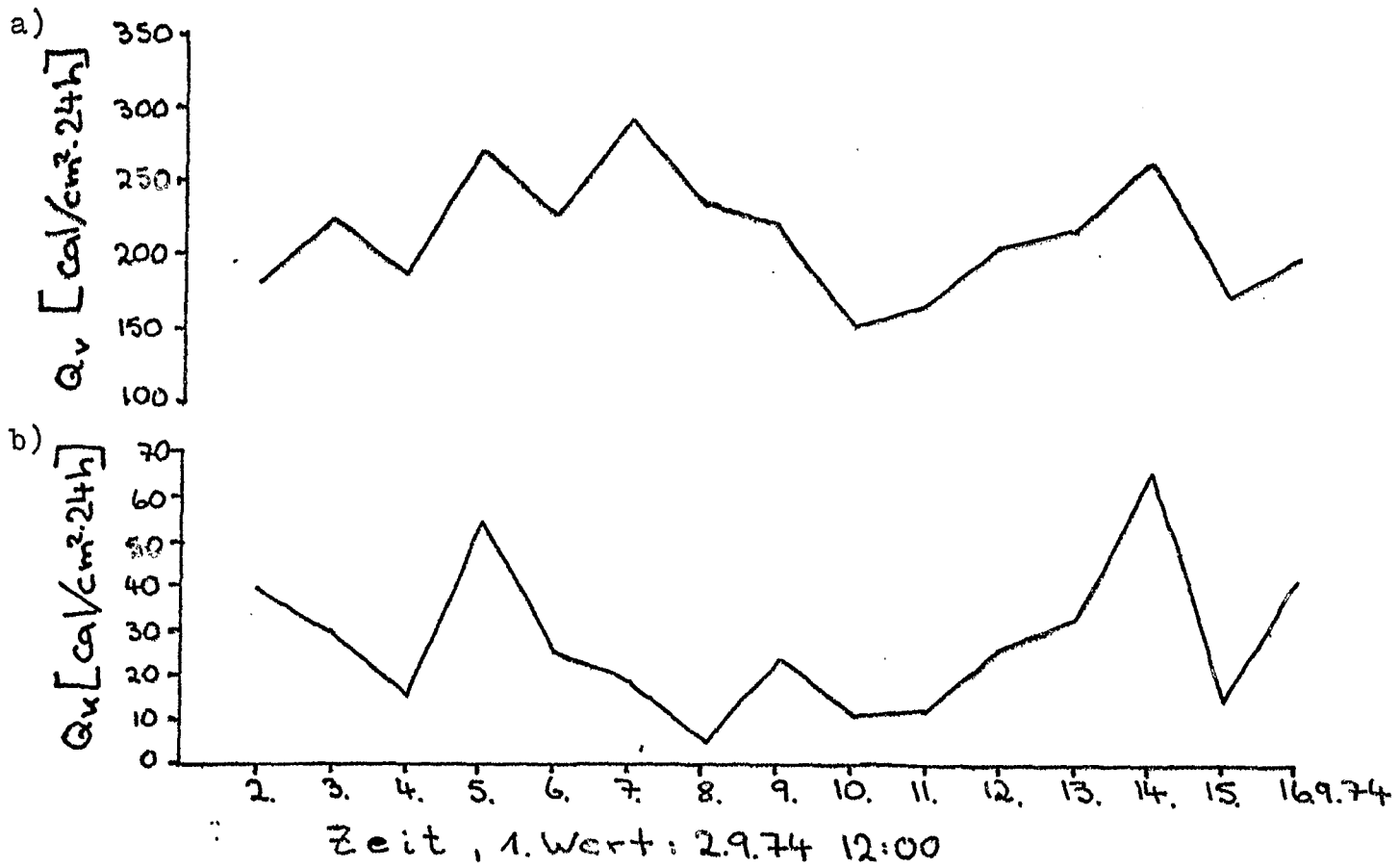
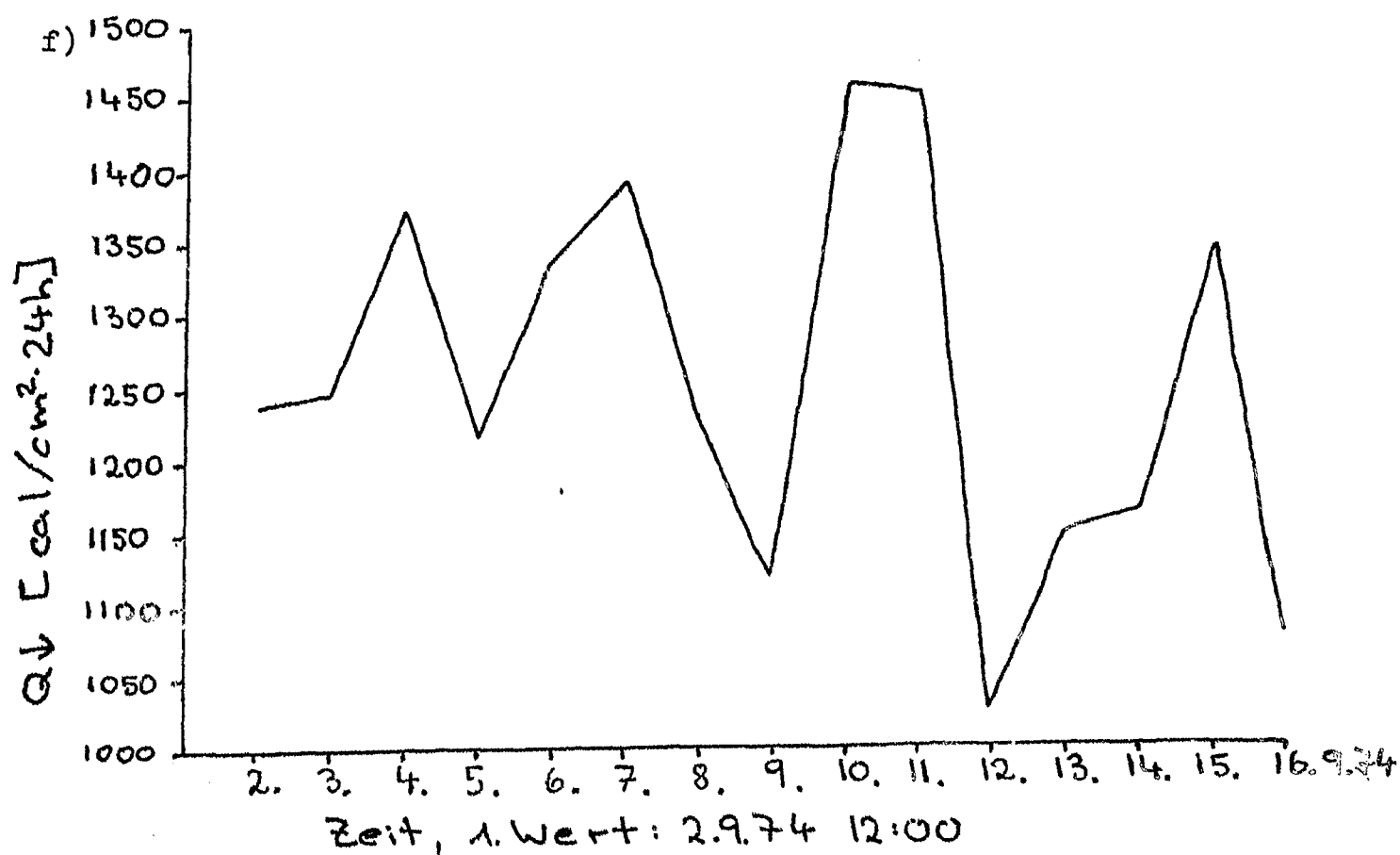
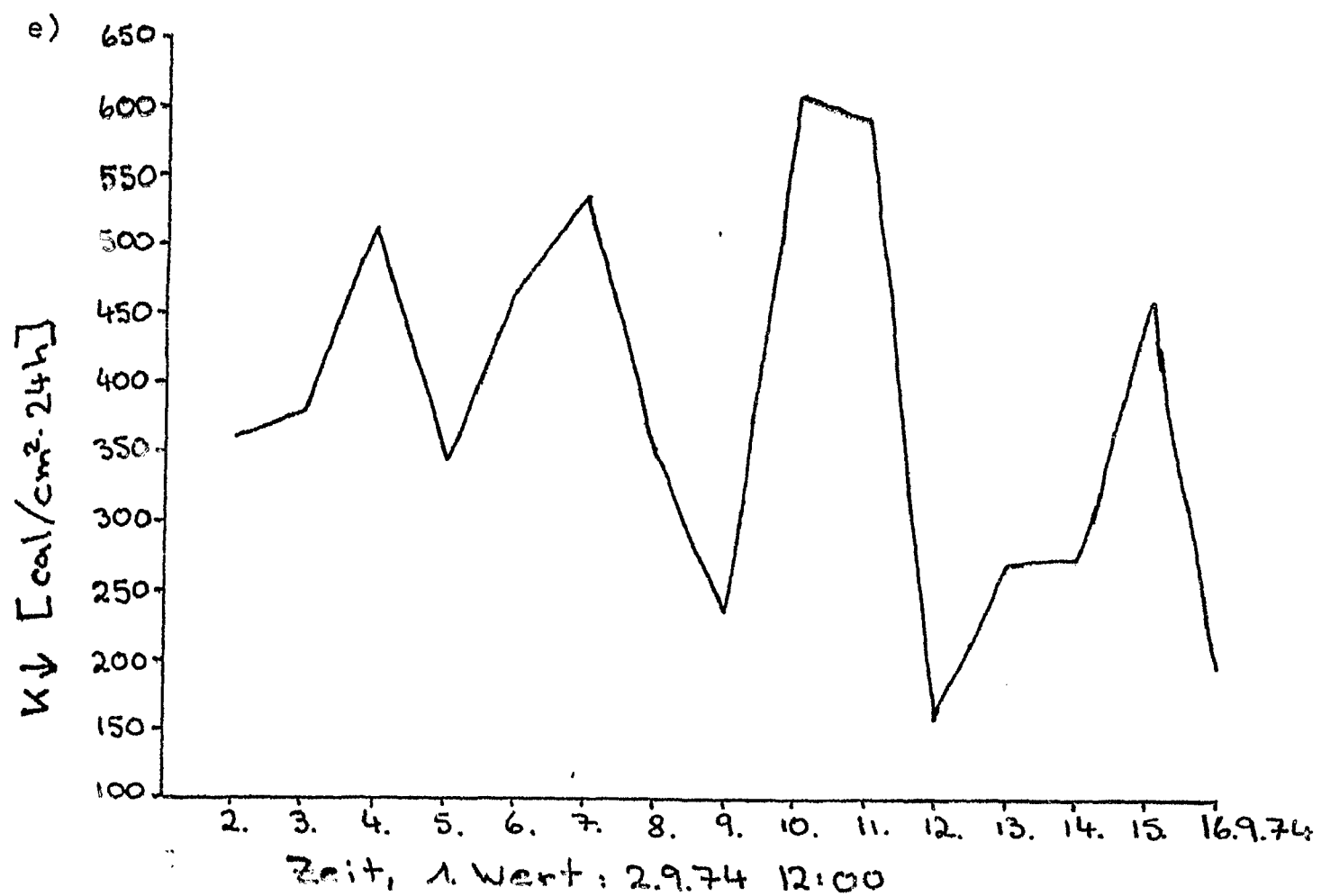


Abb. 6 Darstellung der meteorologischen Parameter



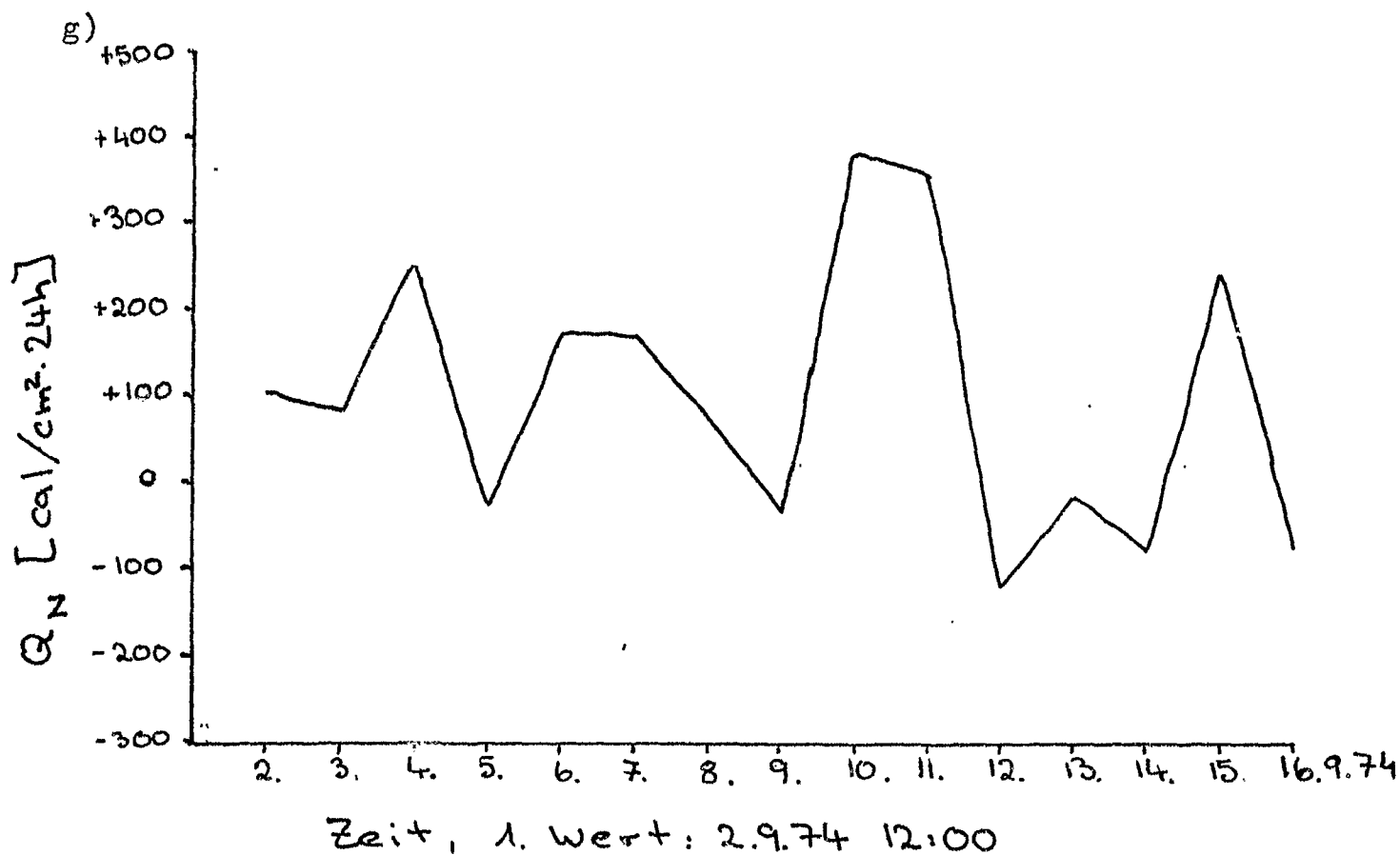


Abb. 6 Darstellung der meteorologischen Parameter

- a) Q_v : latenter Wärmefluß
- b) Q_u : sensibler Wärmefluß
- c) L_{\downarrow} : langwellige Einstrahlung
- d) L_{\uparrow} : langwellige Ausstrahlung
- e) K_{\downarrow} : kurzwellige Einstrahlung
- f) Q_{\downarrow} : kurz- und langwellige Einstrahlung
- g) Q_N : Wärmeaustausch durch die Meeresoberfläche

6.2. Der Wärmeinhalt einer Wassersäule

Nach Gleichung (2) wird der Wärmeinhalt einer Wassersäule mit dem Querschnitt 1 cm^2 für verschiedene Integrationstiefen bestimmt. Die untere Grenze des Wasserkörpers soll so gewählt werden, daß kein Wärmetransport durch sie hindurch stattfindet und daß die Advektion in der Größenordnung der anderen Wärmebilanzterme liegt. Eine genauere Bestimmung der Integrationstiefe findet im Kapitel 6.2.2. statt. Auf Grund des absoluten Fehlers von $0,01^\circ\text{C}$ bei den Temperaturmessungen ergibt sich ein Fehler bei der Bestimmung des Wärmeinhalts von $\delta H = \pm 0,01 \cdot D$ in cal. In Folge der Temperaturprofile wird die mittlere Dichte der Wassersäule $\bar{\rho} = 1,024 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ angenommen und die spezifische Wärme bei konstantem Druck wird $c_p = 0,96 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ gesetzt.

In Abb. 7 sind die mittleren Wärmeinhalte über 24 Stunden zusammengefaßt. Betrachtet man deren Verlauf über die gesamten drei Meßphasen, so ist bis Anfang September deutlich ein Anstieg zu erkennen, der wohl auf die sommerliche Erwärmung zurückzuführen ist (Abb. 7a).

Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Schiffen ergibt folgendes Bild. Während der dritten Meßphase stimmen die von FS 'Meteor' und FS 'Quadra' gemessenen Wärmeinhalte wesentlich besser überein als während der ersten beiden Phasen. Dies ist wohl auf die wechselnden Positionen der Meßschiffe zurückzuführen, nur während der dritten Phase lagen sie etwa in Stromrichtung zueinander. Gegen Ende der letzten Meßphase tritt wiederum eine Diskrepanz auf, die teilweise durch die verschiedenen Einstrahlungsverhältnisse zu erklären ist. Während bei FS 'Meteor' die Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche am 12.9.74 ein Minimum hat und dann langsam ansteigt, ist sie bei FS 'Quadra' sowohl am 12.9.74 als auch am 13.9. und 14.9. relativ gering und nimmt am 15.9.74 stark zu, wobei sie somit einen großen Anstieg des Wärmeinhalts verursacht. Die gleiche Zunahme ist auch bei den von FS 'Planet' gewonnenen Daten zu beobachten, die sonst allgemein etwas niedriger liegen als die der beiden anderen Schiffe. Allerdings ist dieser starke Anstieg des Wärmeinhalts nicht allein auf die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre zurückzuführen, da diese doch deutlich geringer ist als die Zunahme des Wärmeinhalts.

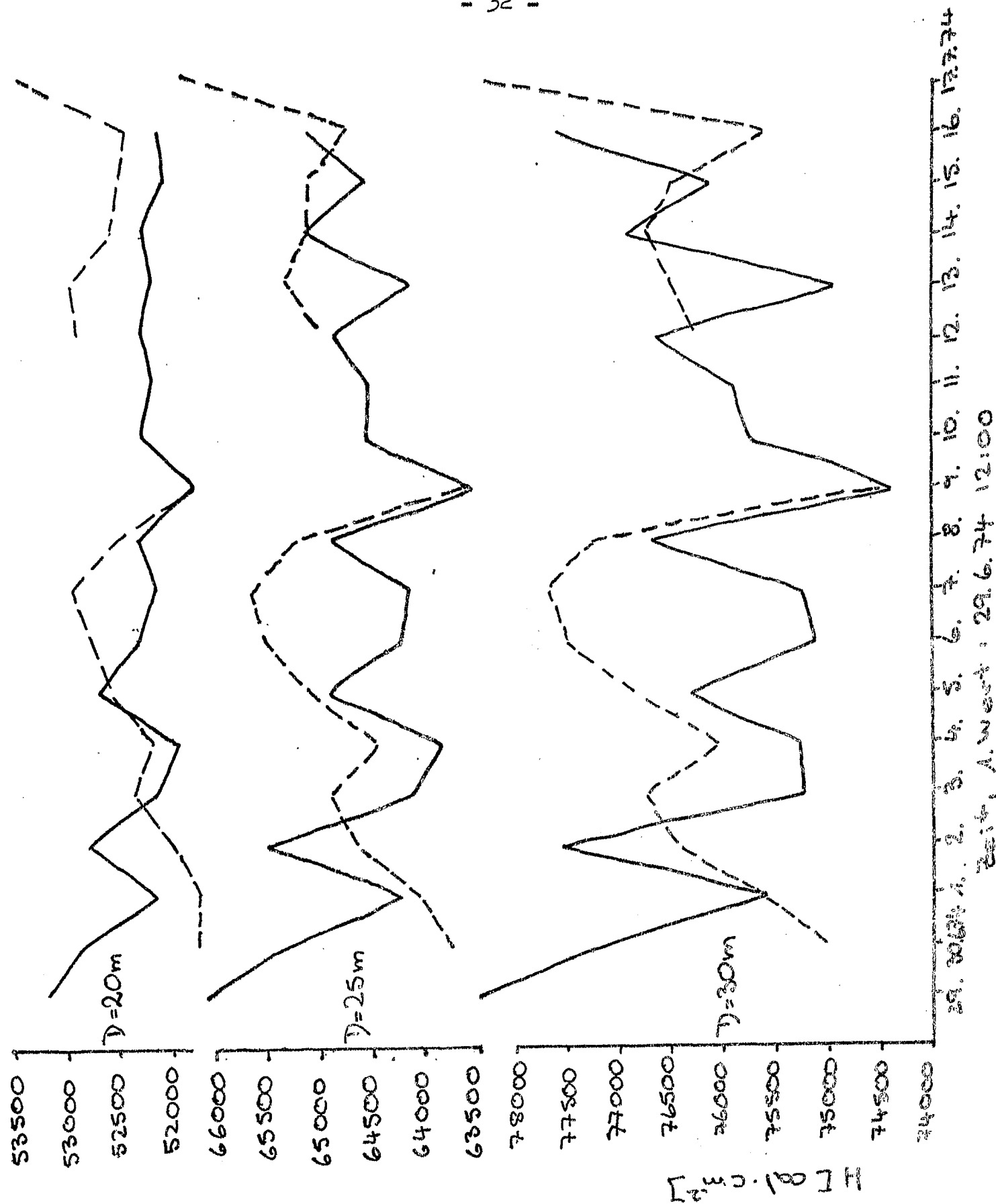
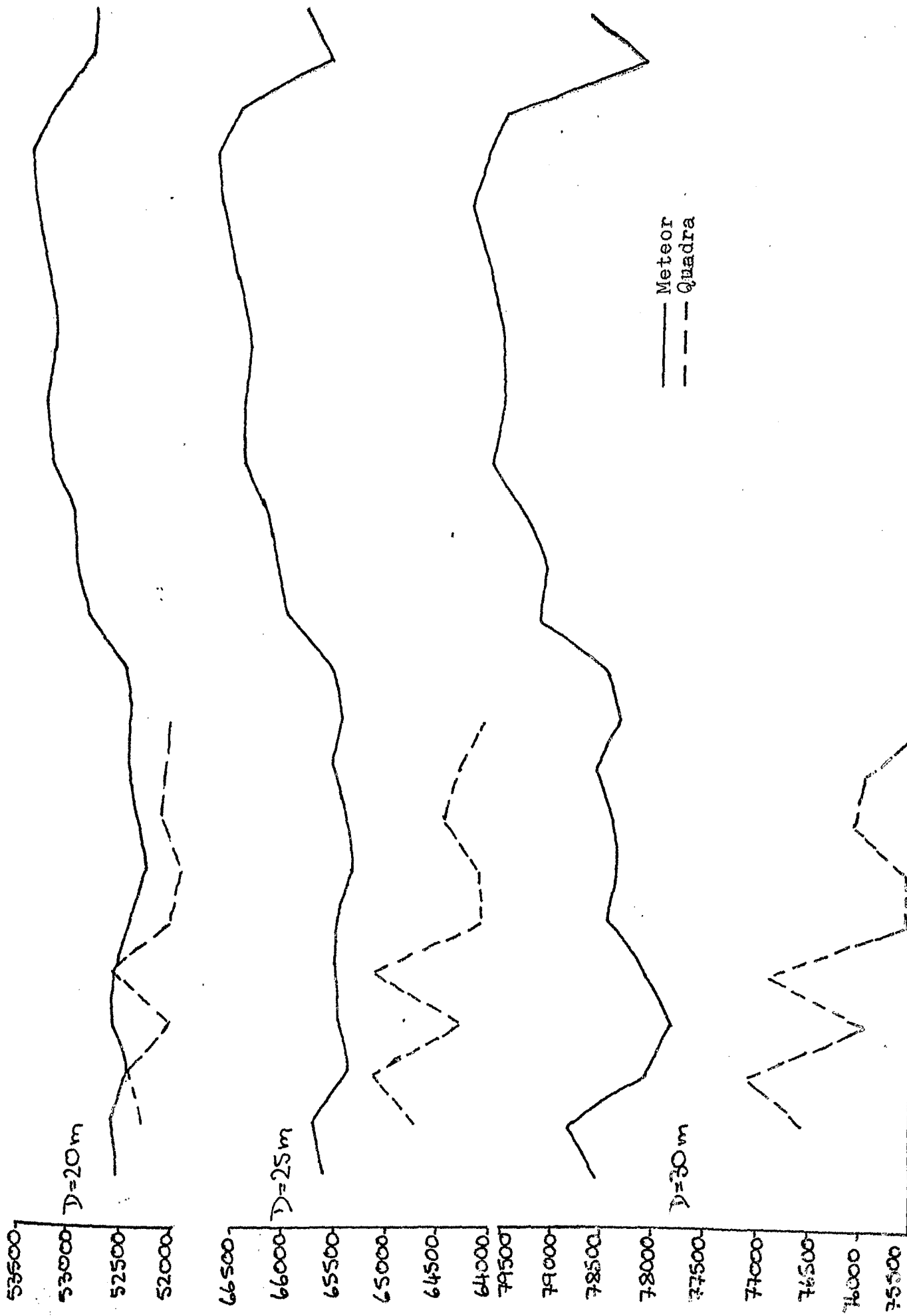


Abb. 7b Wärmeinhalte für verschiedene
Integrationstiefen
1. Meßphase

— Meteor
--- Quadra



27. 23. 29. 30. 31. 74 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 74.
 Zeit, A. West: 27. 74 12:00

Abb. 7c Wärmeinhalte für verschiedene Integrationstiefen, 2. Messphase

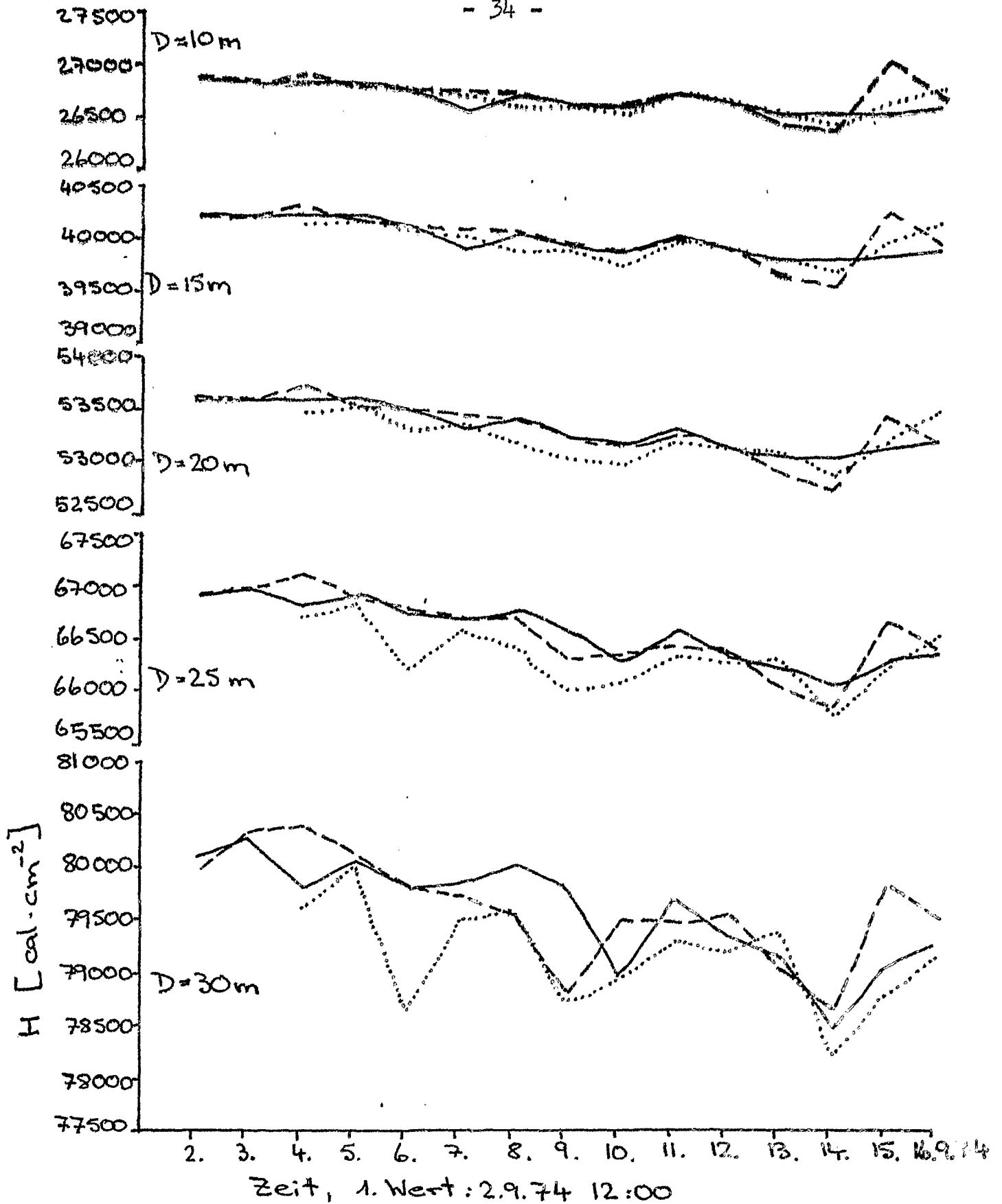


Abb. 7d Wärmehalte für verschiedene
Integrationstiefen
3. Meßphase

— Meteor
- - - Quadra
..... Planet

6.2.1. Die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts

In Abb. 8 sind die zeitlichen Änderungen des Wärmeinhalts innerhalb von 24 Stunden für ebenfalls verschiedene Integrationstiefen aufgetragen. Im Vergleich zu den letzten beiden Meßphasen treten während der ersten wesentlich größere Schwankungen auf, wobei dieses Phänomen auch bei der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche zu beobachten ist. Falls die Advektion und turbulente Diffusion im Meer vernachlässigbar wären, müßte die Änderung des Wärmeinhalts über einen Zeitraum mit dem Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre über den gleichen Zeitraum übereinstimmen. Ein Vergleich dieser beiden Terme erfolgt in Kapitel 7.1.

Auffällig ist die gute Übereinstimmung der von den verschiedenen Schiffen gemessenen Wärmeinhaltsänderungen in dem Zeitraum vom 9.9.74 bis zum 12.9.74. Diese Tage zeichnen sich dadurch aus, daß die Einstrahlung vom 9.9. auf den 10.9.74 sehr stark ansteigt, am 10.9. und 11.9.74 maximale Werte erreicht und am 12.9.74 wieder rapid abfällt. Eine genauere Untersuchung dieses Zeitraums findet in Kapitel 7.1.3. statt.

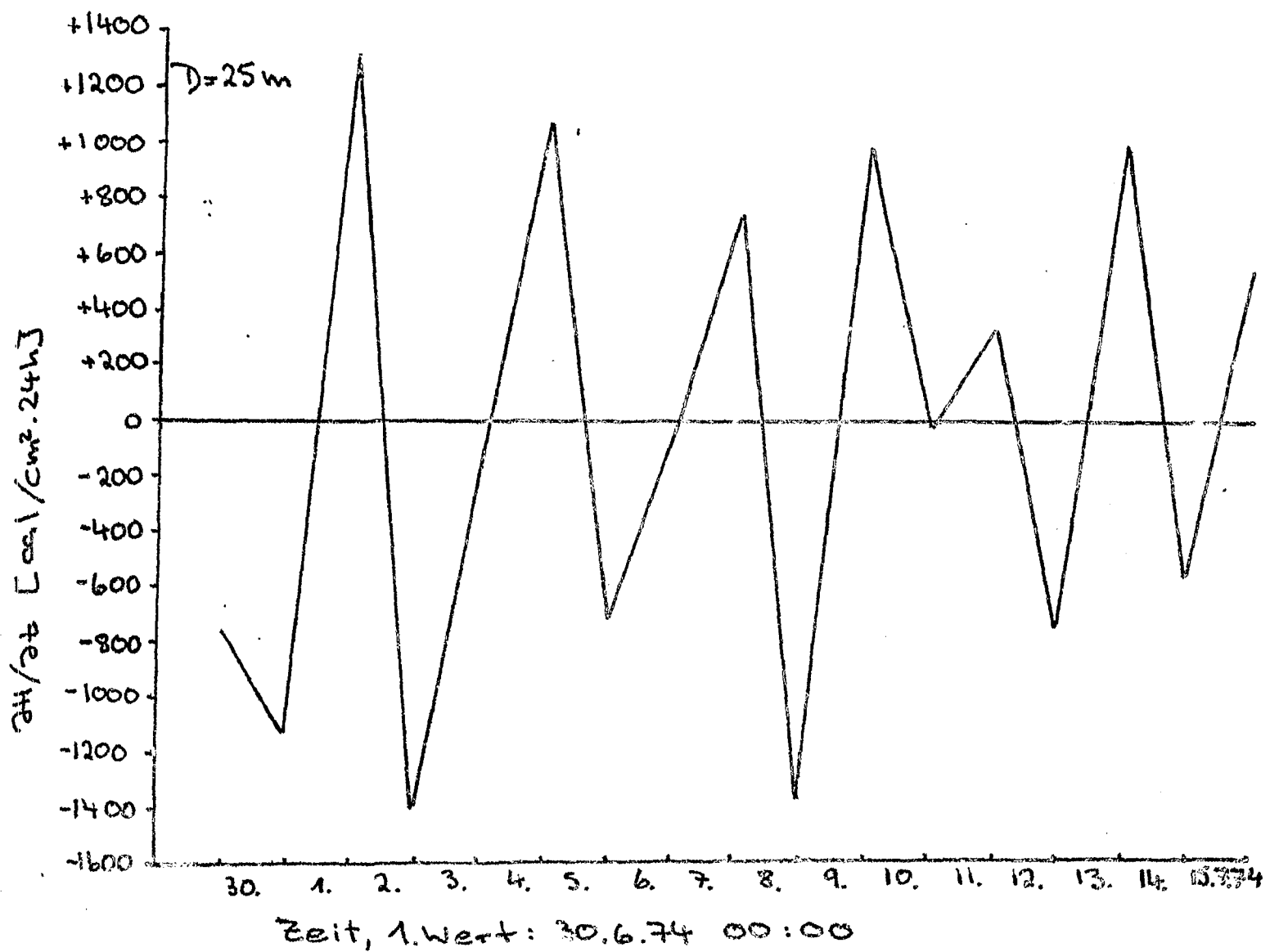
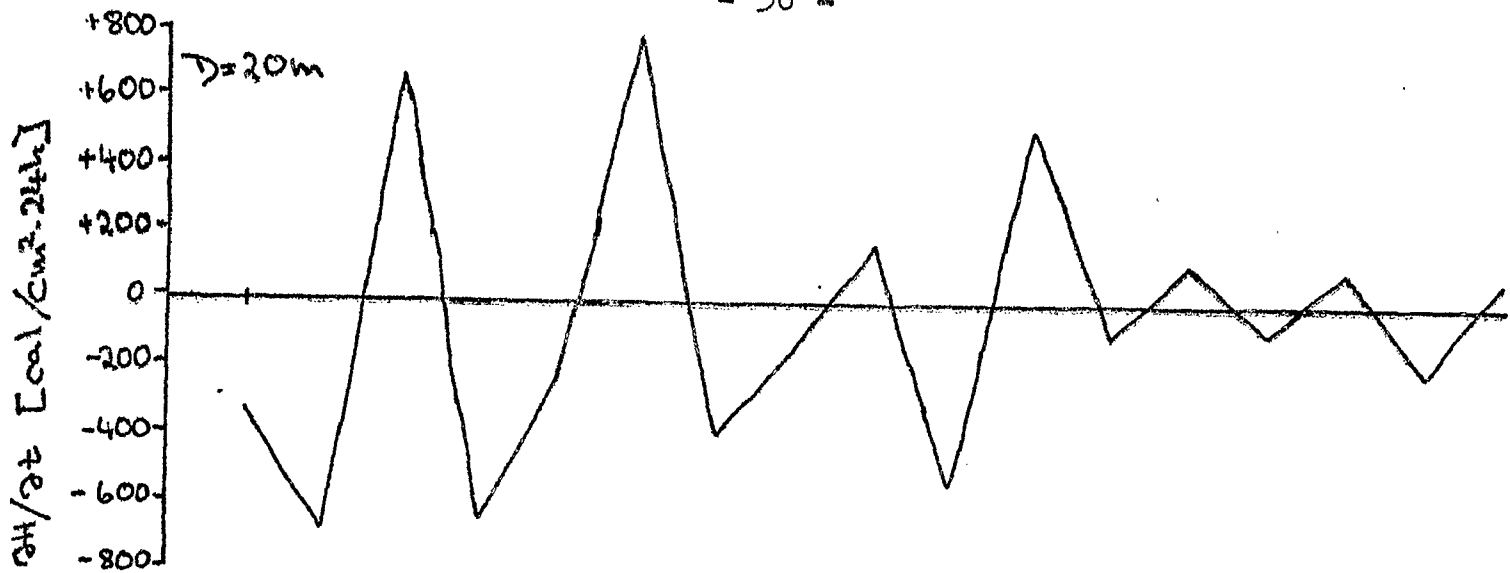


Abb. 8a. Änderungen der Wärmehalte in 24 Stunden für verschiedene Integrationstiefen

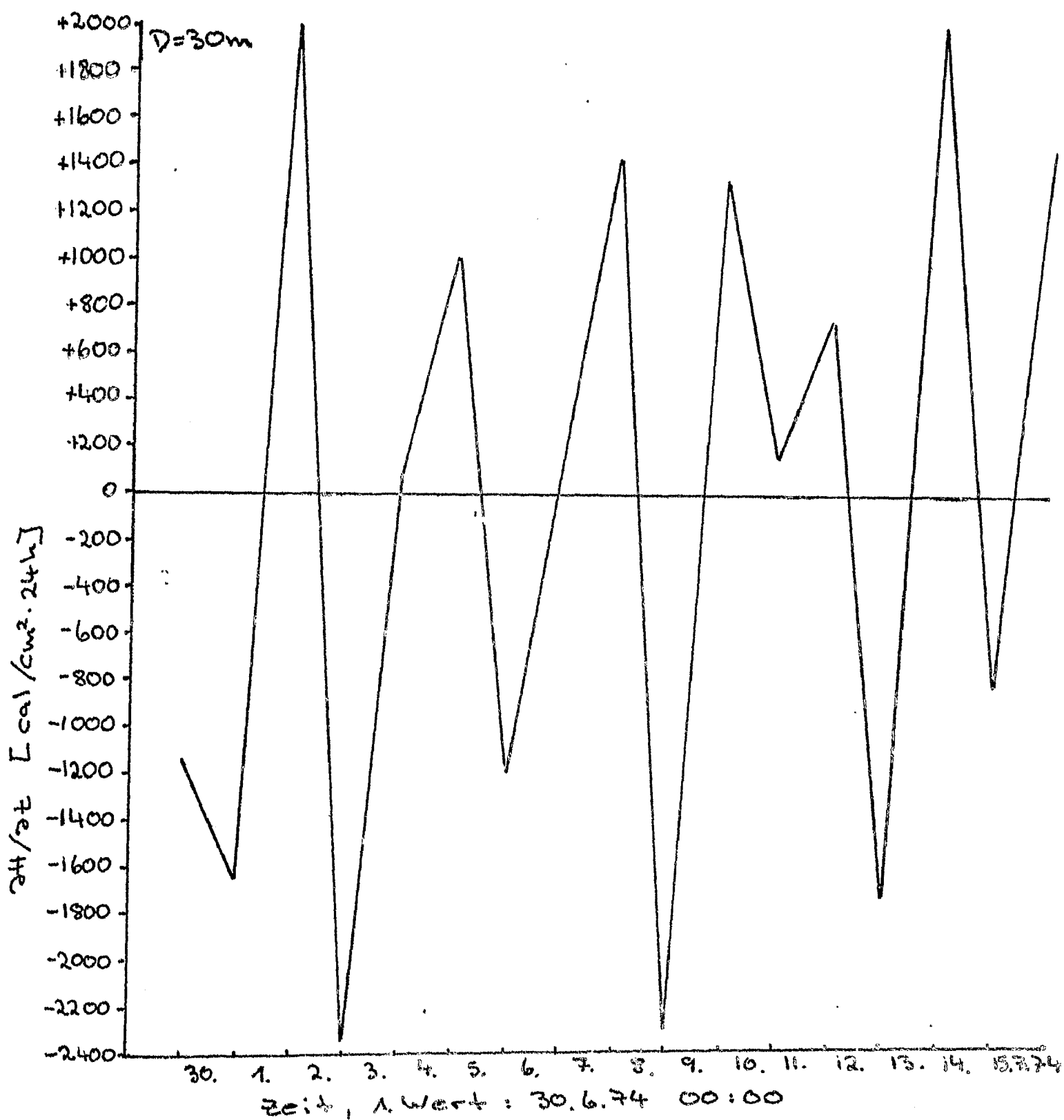


Abb. 8a Änderungen der Wärmeinhalte in 24 Stunden
Meteor, 1. Meßphase

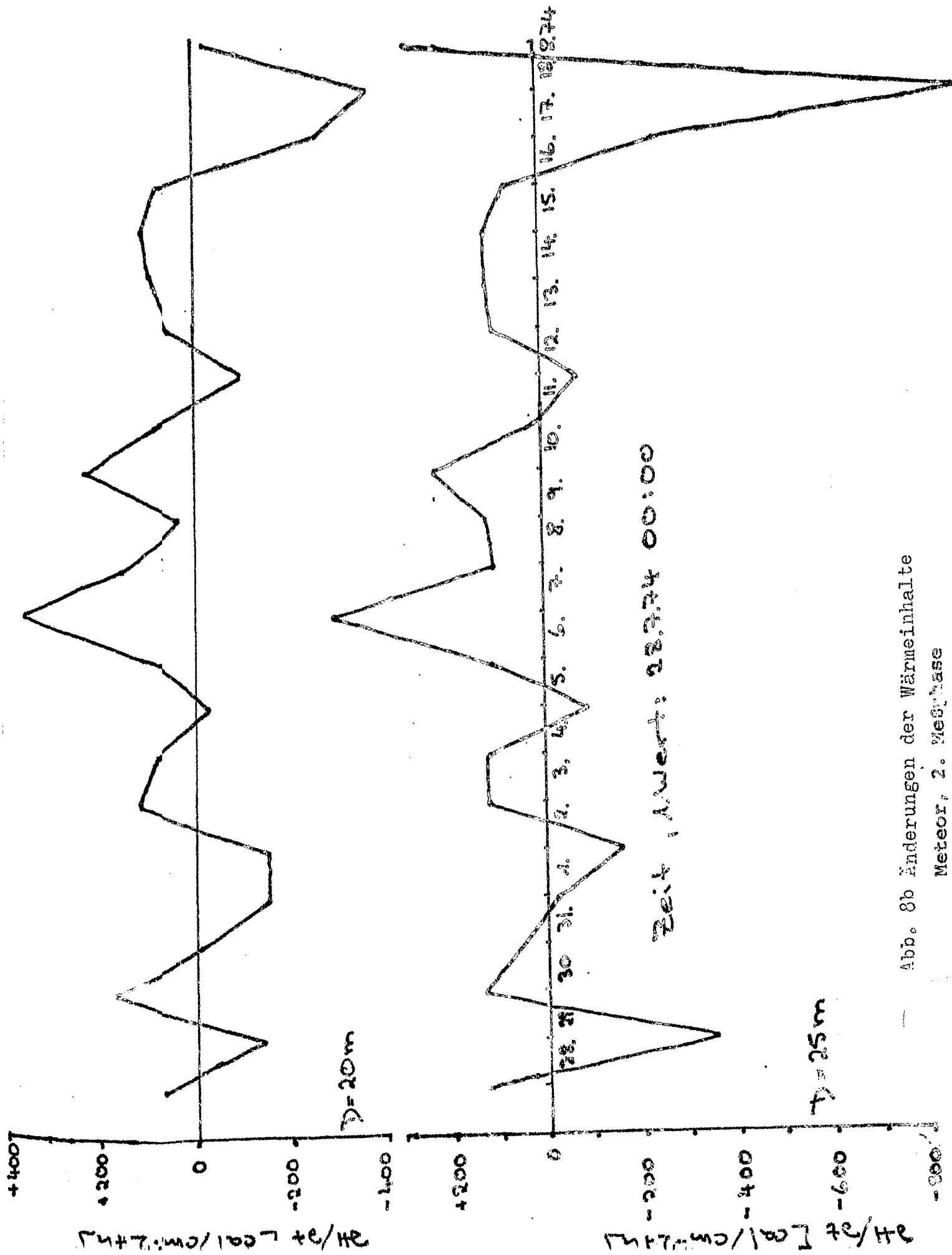


Abb. 8b Änderungen der Wärmeinhalte
Meteor, 2. Meßphase

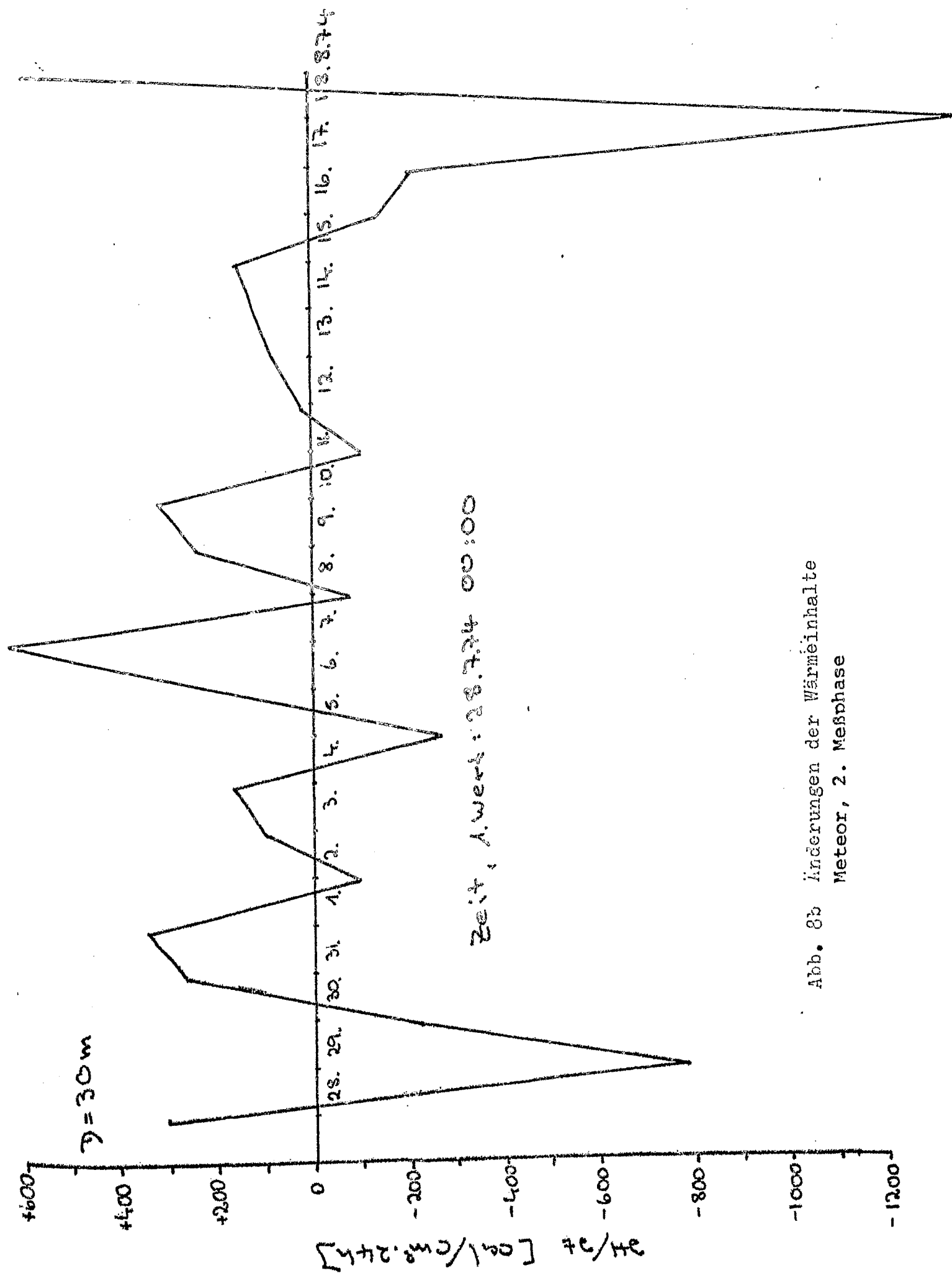


Abb. 8b Änderungen der Wärmeinhalt
Meteor, 2. Meßphase

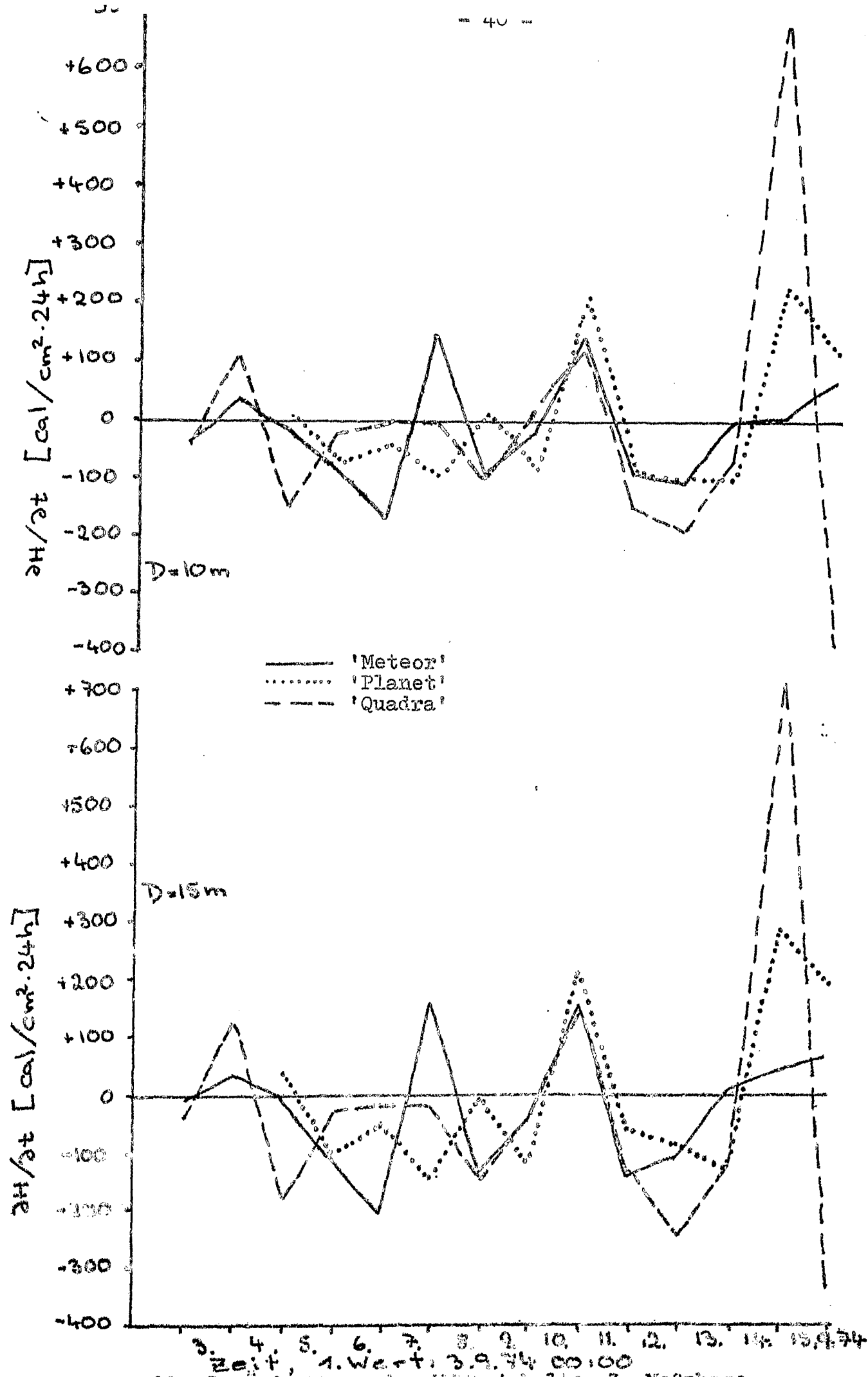
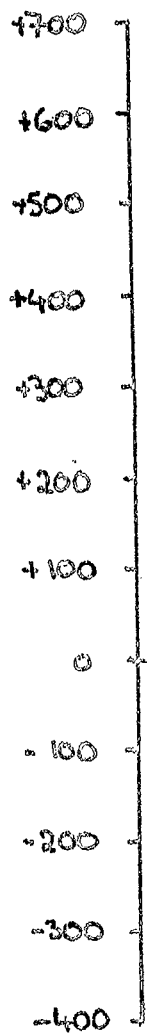


Abb. 88 Änderungen der Wärmeinhalte, 3. Meßphase

Abb. 8c Änderungen der Wärmehalte
3. Meßphase

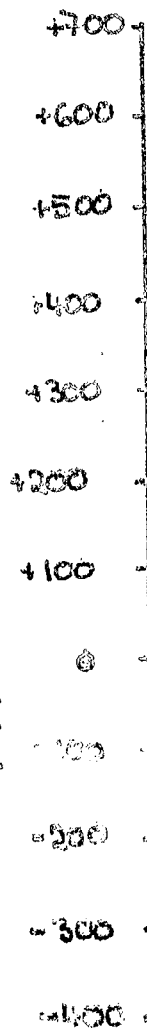
$\frac{\partial H}{\partial t} \text{ [cal/cm}^2 \cdot 24h]$



$D=20m$

— 'Meteor'
..... 'Planet'
- - - - - 'Quadra'

$\frac{\partial H}{\partial t} \text{ [cal/cm}^2 \cdot 24h]$



$D=25m$

5. 9. 74 6. 9. 74 7. 9. 74 8. 9. 74 9. 9. 74 10. 9. 74 11. 9. 74 12. 9. 74 13. 9. 74 14. 9. 74 15. 9. 74

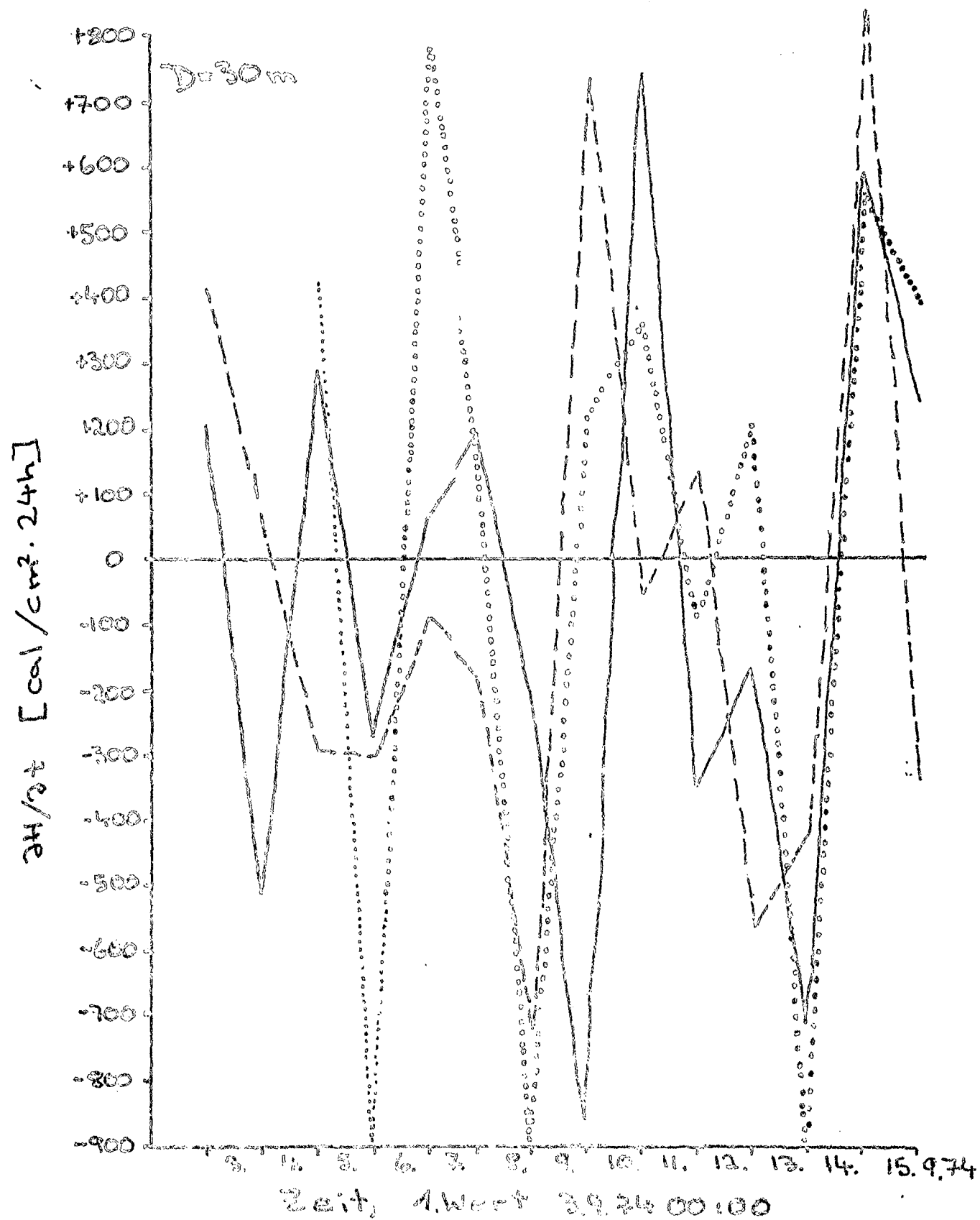


Abb. 80 Änderungen der Wärmehalte

3. Meßplase

----- 'Isteon'

..... 'Planet'

o o o o 'Quadra'

6.2.2. Bestimmung der Integrationstiefe

Wie man in den Abb. 7 und 8 erkennen kann, ist die Wahl der Integrationstiefe für die Bestimmung des Wärmeinhalts und seiner zeitlichen Änderung von außerordentlicher Bedeutung, so daß die folgenden Dinge dabei berücksichtigt werden sollten. Die Integrationstiefe D soll so gewählt werden, daß kein Wärmetransport durch sie hindurch stattfindet, so daß wir die Terme $gc_p w T|_0$ und $\rho \frac{\partial T}{\partial z}|_0$ in der Wärmebilanzgleichung (8) vernachlässigen können. Außerdem soll darauf geachtet werden, daß die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts und die Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche die gleiche Größenordnung besitzen, da sonst der Wärmeinhalt vorwiegend von der Advektion und horizontaler turbulenter Diffusion bestimmt wäre. Bei der Betrachtung der Temperaturzeitreihen in Abb. 9 fällt auf, daß im Bereich zwischen 30m und 100m starke Schwankungen vorhanden sind, die großteils auf interne Wellen zurückzuführen sind. In diesem Bereich ist der vertikale Wärmetransport in Folge von internen Wellen durch eine feste Integrationstiefe D also nicht vernachlässigbar. Ein Vergleich zwischen der zeitlichen Änderung des Wärmeinhalts und der Wärmezufuhr aus der Atmosphäre ergibt weiterhin, daß es nicht sinnvoll ist, die Untergrenze tiefer als 100m zu legen, da in diesem Fall der Wärmeinhalt fast ausschließlich durch Advektion bestimmt wird.

Wenn die Deckschichttiefe von der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche bestimmt ist, erscheint es passend, gerade sie als Integrationstiefe zu wählen. An Hand der Druckzeitreihen der Isopyknen und Isothermen, die in Abb. 10 und 11 dargestellt sind, erkennt man, daß die Deckschichttiefe etwa dem Verlauf der $\sigma_t = 23.4$ Isopykne bzw. der $T = 27.0^\circ\text{C}$ Isotherme entspricht. Die Untergrenze der Wassersäule, deren Wärmeinhalt bestimmt wird, verläuft nun entlang dieser Isopykne bzw. Isotherme und ist somit mit der Zeit veränderlich. Die daraufhin berechneten Wärmeinhalte sind in Abb. 12 dargestellt. Die berechneten Änderungen der Wärmeinhalte sind wesentlich größer als die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre in diesem Zeitraum, die somit also nicht für die Schwankungen der Deckschichttiefe verantwortlich sein kann. Die Änderungen der Deckschichttiefe

sind wohl größtenteils auf das interne Wellenfeld zurückzuführen. Es ist also angebracht, eine konstante Integrationstiefe zu wählen, die oberhalb des Einflußbereichs der internen Wellen liegt.

Weiterhin wird ein kurzer Zeitraum mit besonders starker Einstrahlung untersucht in der Hoffnung, daß in diesem Fall die Advektion gegenüber der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche vernachlässigbar sei (Kapitel 7.1.3.). In diesem Fall, es handelt sich dabei um den 10.9.74 und 11.9.74, ist der Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre annähernd gleich der Änderung des Wärmeinhalts, wenn man eine Integrationstiefe von 25m wählt. Bei einer weniger starken Einstrahlung ist die Änderung des Wärmeinhalts einer Wassersäule mit der Untergrenze in 25m Tiefe allerdings mehr durch den vertikalen Wärmetransport durch diese Integrationstiefe in Folge von internen Wellen bestimmt. Außerdem ist in 25m Tiefe der vertikale Temperaturgradient schon so groß, daß die vertikale turbulente Diffusion nicht zu vernachlässigen ist. (Abb. 5).

Es erscheint recht sinnvoll, eine Integrationstiefe von 20m zu wählen, denn nur in wenigen Fällen wird die Wärme, die durch die Meeresoberfläche zugeführt wird, tiefer eindringen, und der Wärmetransport durch die Untergrenze ist noch vernachlässigbar klein.

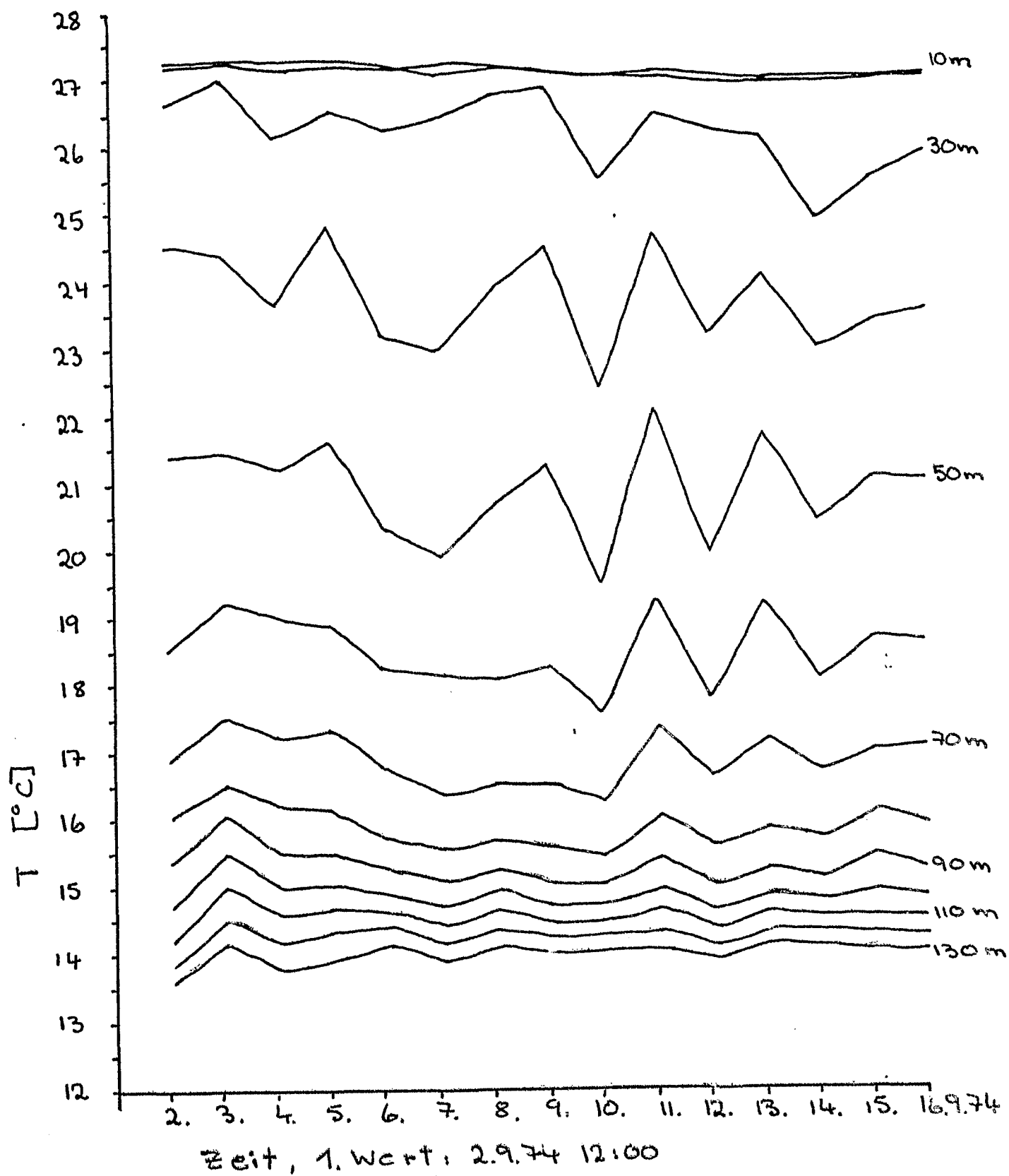


Abb. 9 Die Temperaturzeitreihen in
10m-130m, alle 10m
Meteor, Multisonde, 3. Meßphase

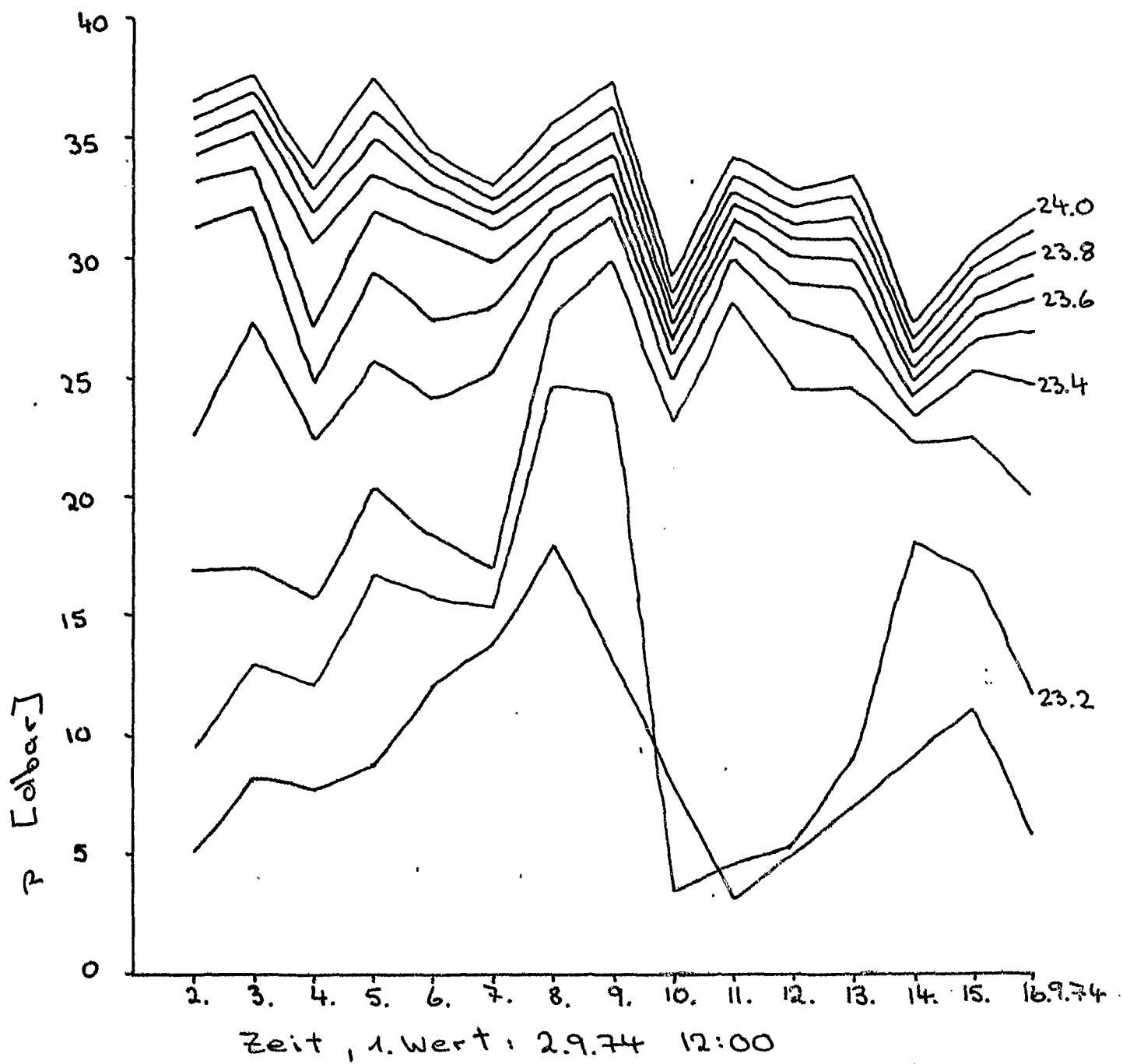


Abb. 10a Druckzeitreihen auf $\sigma_t = \text{const.}$ (23.1-24.0)
Meteor, Multisonde, 3. Meßphase

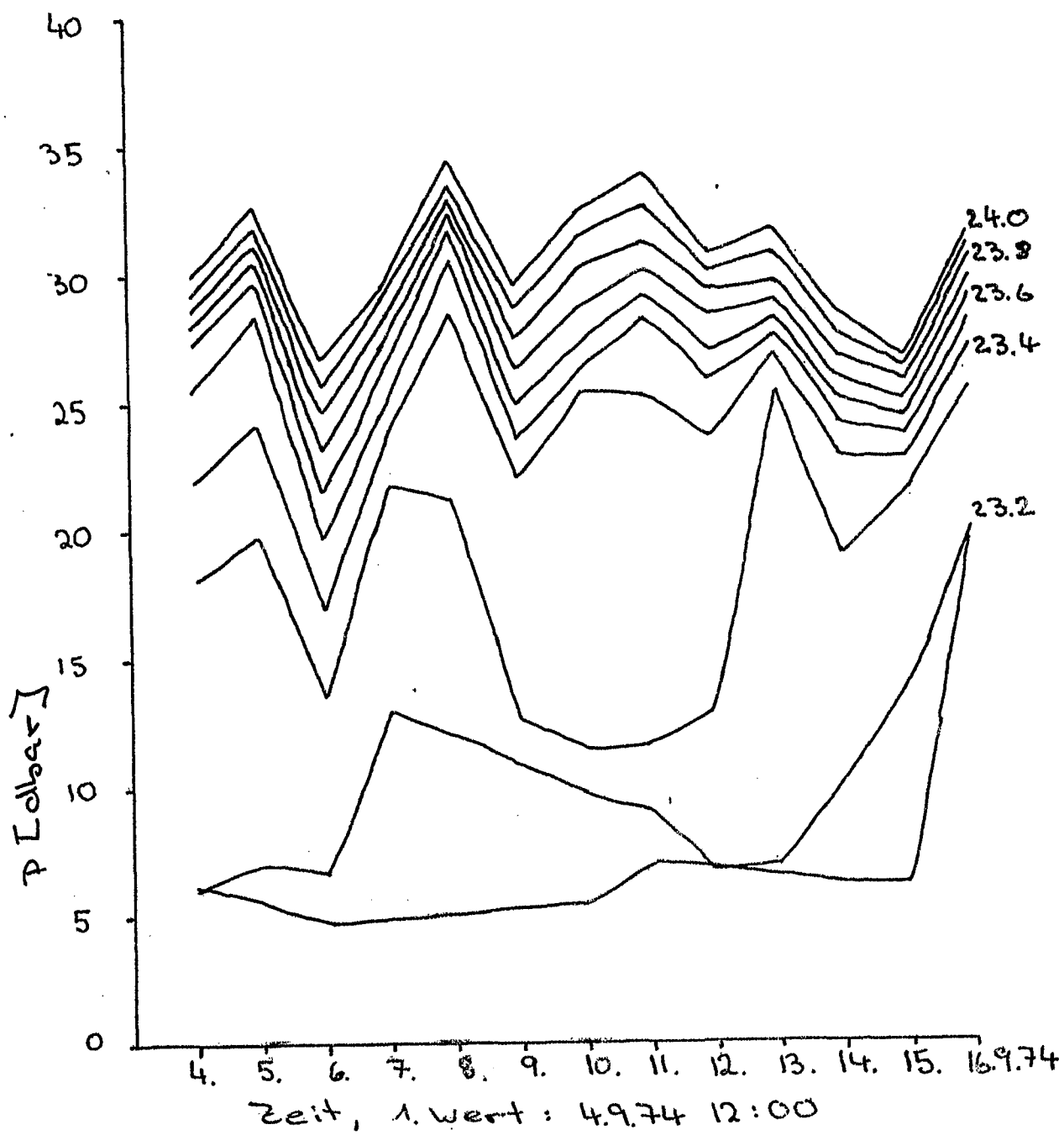


Abb. 10b Druckzeitreihen auf $\sigma_t = \text{const.}$ (23.1-24.0)
Planet, Bathysonde, 3. Meßphase

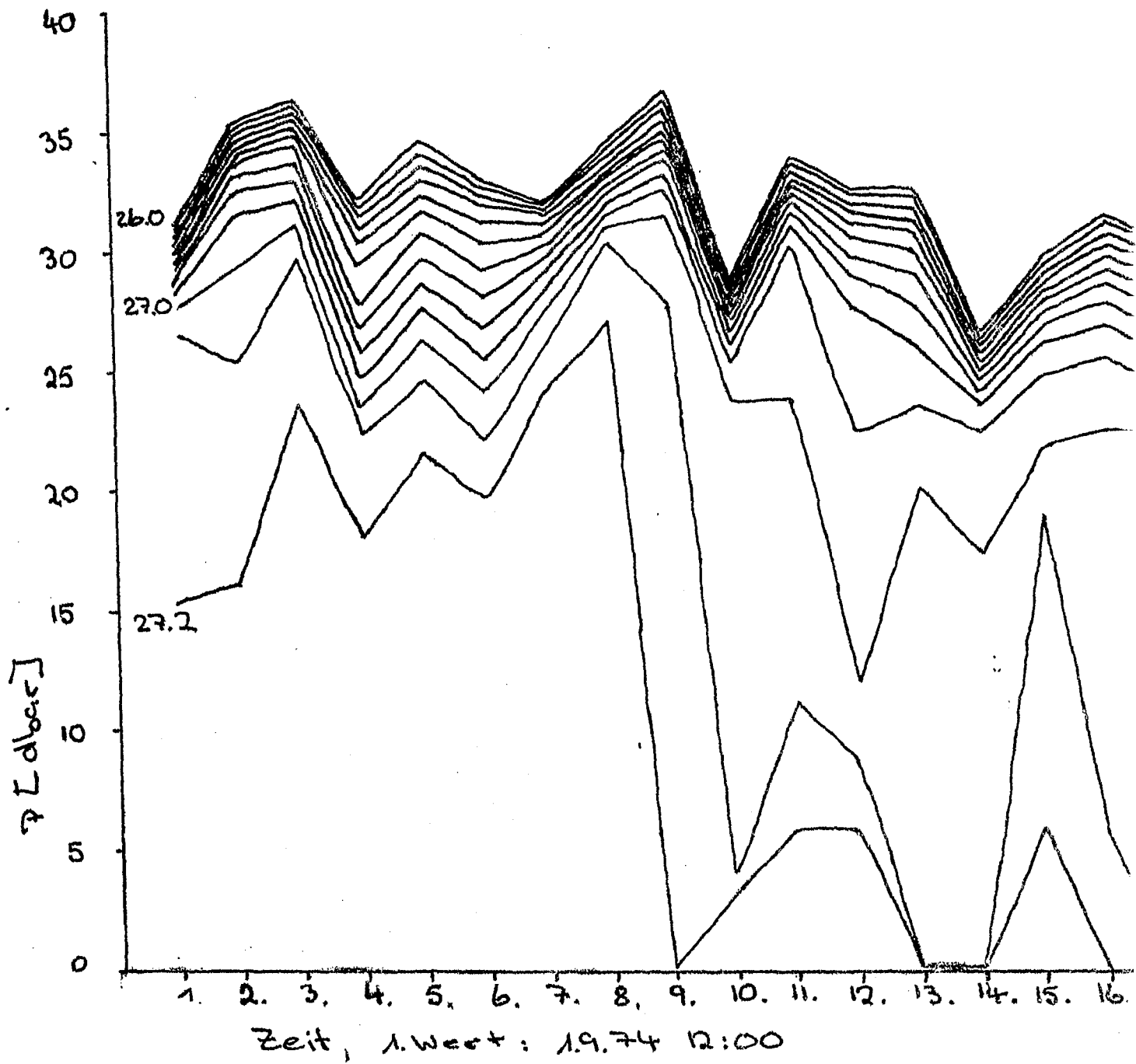


Abb. 11 Druckzeitreihen auf $T = \text{const.}$ (26.0-27.2°C)
Meteor, Multisonde, 3. Meßphase

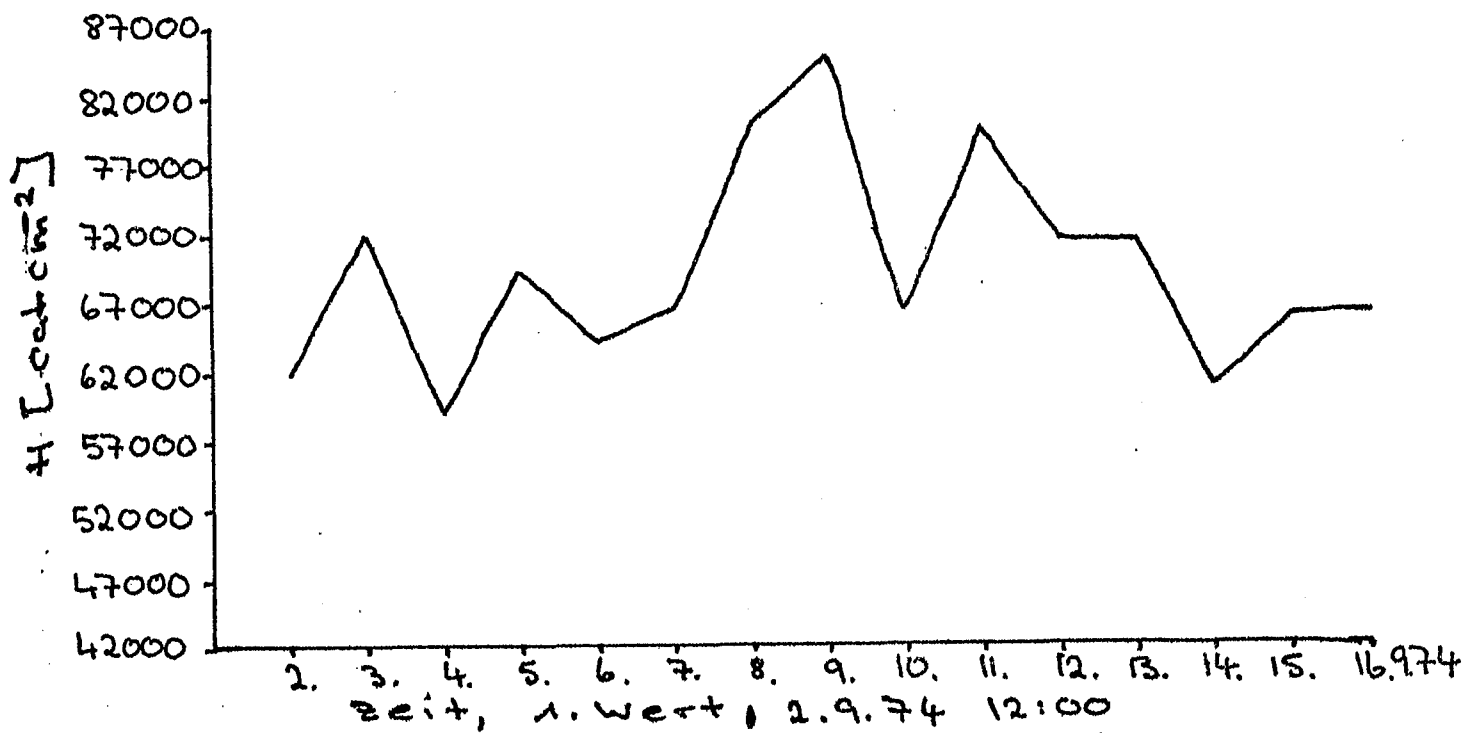


Abb. 12a Wärmeinhalt mit $D \hat{=} G_4 = 23.4$

Meteor, Multisonde, 3. Meßphase

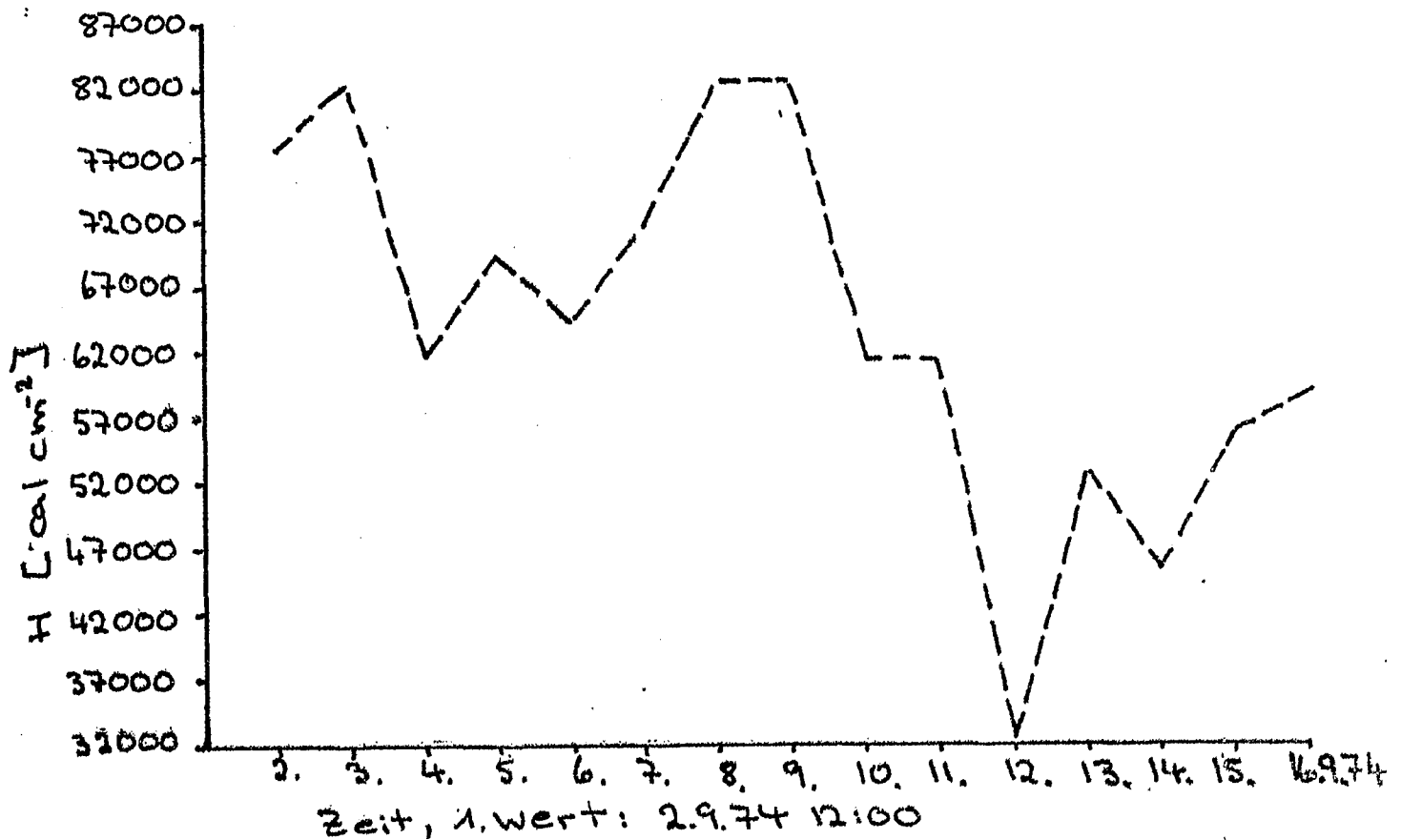


Abb. 12b Wärmeinhalt mit $D \hat{=} T = 27.0^\circ\text{C}$

Meteor, Multisonde, 3. Meßphase

6.3. Bestimmung der Advektion

Die Messungen fanden in der äquatorialen Gegenstromregion statt, wobei die mittlere Geschwindigkeit in der Deckschicht etwa $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ betrug. Bei solch relativ großen Geschwindigkeiten ist zu erwarten, daß die Advektion eine wichtige Rolle im Wärmehaushalt spielt. Die Advektion kann sowohl indirekt als auch direkt mit Hilfe der Gleichung (8) bestimmt werden.

Bei der indirekten Methode geht man davon aus, daß kein Wärmetransport durch die Untergrenze stattfindet und daß die horizontale turbulente Diffusion vernachlässigbar ist. In diesem Fall erhält man aus der Differenz zwischen der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche und der zeitlichen Änderung des Wärmeinhalts die Advektion. In Abb. 13 ist die Differenz zwischen diesen beiden Termen dargestellt, und im Mittel beträgt sie etwa $150 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24 \text{ h}$. In der Regel ist die Wärmeinhaltsänderung kleiner als die Zufuhr aus der Atmosphäre, so daß unter anderen durch Strömungen Wärme fortgetragen bzw. kälteres Wasser zugeführt wird.

Bei der direkten Methode werden die beiden advektiven Terme $u \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$ und $v \cdot \frac{\partial H}{\partial y}$ mit Hilfe der Messungen der Forschungsschiffe 'Meteor', 'Planet' und 'Quadra' und den Verankerungen F1 und E3 berechnet. Von den Verankerungen stammen die verwendeten Strömungsdaten, die sowohl über 24 Std (Abb. 14) als auch jeweils über die gesamte Meßdauer gemittelt wurden. Es erscheint recht sinnvoll, gerade die VACM-Daten in 7m bzw 7.6m Tiefe dieser Verankerungen zu verwenden, da ihre Position in etwa der Mitte zwischen den verschiedenen Schiffen lag. Bis zum 8.9.74 stimmen die Strömungsdaten der beiden Verankerungen recht gut überein, danach treten bei der F1-Verankerung höhere Stromgeschwindigkeiten auf, die auf Divergenzen und Konvergenzen im Stromfeld schließen lassen. Bei einem Vergleich zwischen den berechneten Advektionstermen mit Hilfe der 24 Std Mittelwerte und dem Mittelwert über die gesamte Meßdauer stellt man fest, daß die Ergebnisse bis auf den 8.9.74 nahezu übereinstimmen (Abb. 15). Die horizontalen Wärmeinhaltsgradienten werden auf Grund der Messungen von FS 'Meteor' und FS 'Planet', bzw. FS 'Meteor' und FS 'Quadra' mit Hilfe der entsprechenden meridionalen und zonalen Abstände gebildet.

In Tab. 3 stehen die genauen Positionen der Meßplattformen und ihre gegenseitigen Abstände, und in Abb. 16 sind die horizontalen Wärmeinhaltsgradienten dargestellt. Die Wärmeinhaltsänderungen zwischen FS 'Meteor' und FS 'Quadra' sind so klein, daß die Advektionsterme sehr gering bleiben, wobei die Schwankung am Ende der Zeitreihe der Advektion auf die bereits erwähnte Wärmeinhaltserhöhung bei FS 'Quadra' zurückzuführen ist. In Abb. 15 sind die advektiven Terme auf Grund von verschiedenen Berechnungen aufgetragen. Der Mittelwert der mit Hilfe der Messungen von FS 'Meteor' und FS 'Planet' berechneten Advektion liegt bei etwa $60 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24 \text{ h}$ und entspricht somit etwa der Hälfte des Ergebnisses mit Hilfe der indirekten Methode. Die berechneten Advektionswerte sind allerdings recht unzuverlässig, da eine genauere Bestimmung des Wärmeinhaltsgradienten mit Hilfe der weit auseinanderliegenden Schiffe nicht möglich ist und die räumliche Inhomogenität des Stromfeldes nicht berücksichtigt wurde. So können die berechneten Ergebnisse bestenfalls Größenordnungen widerspiegeln.

Tabelle 3

Positionen der Meßplattformen und ihre gegenseitigen Abstände
in km während Phase III

Meteor: $8^{\circ}30' \text{ N}$, $23^{\circ}30' \text{ W}$
Planet: $9^{\circ}15' \text{ N}$, $23^{\circ}05' \text{ W}$
Quadra: $9^{\circ}18' \text{ N}$, $22^{\circ}37,5' \text{ W}$
F1-Verankerung: $8^{\circ}49,9' \text{ N}$, $22^{\circ}52,6' \text{ W}$

Abstände in km:

	x	y
Meteor - Planet	46,3	83,34
- Quadra	97,23	88,90
- F1-Verankerung	69,26	36,85
Planet - Quadra	50,93	-5,56
- F1-Verankerung	22,96	-46,48
Quadra - F1-Verankerung	-27,96	-52,04

Dabei wird folgendes Koordinatensystem verwendet

x-Achse : positiv nach Osten

y-Achse : positiv nach Norden

z-Achse : positiv zum Erdmittelpunkt

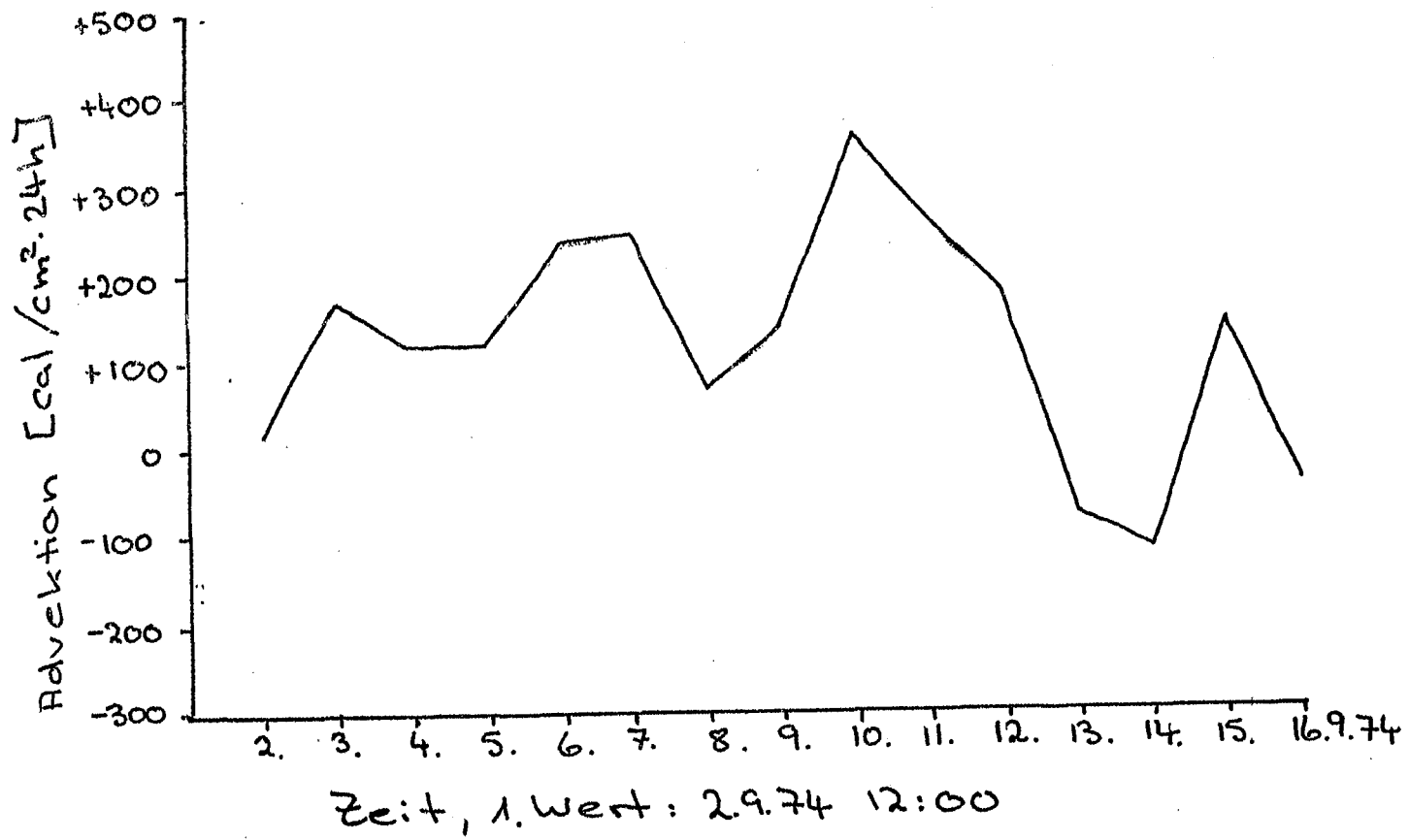


Abb. 13 Indirekt berechnete Advektion
($Q_v = \frac{\partial H}{\partial t}$ mit $D = 20 \text{ m}$)
Meteor, 3. Meßphase

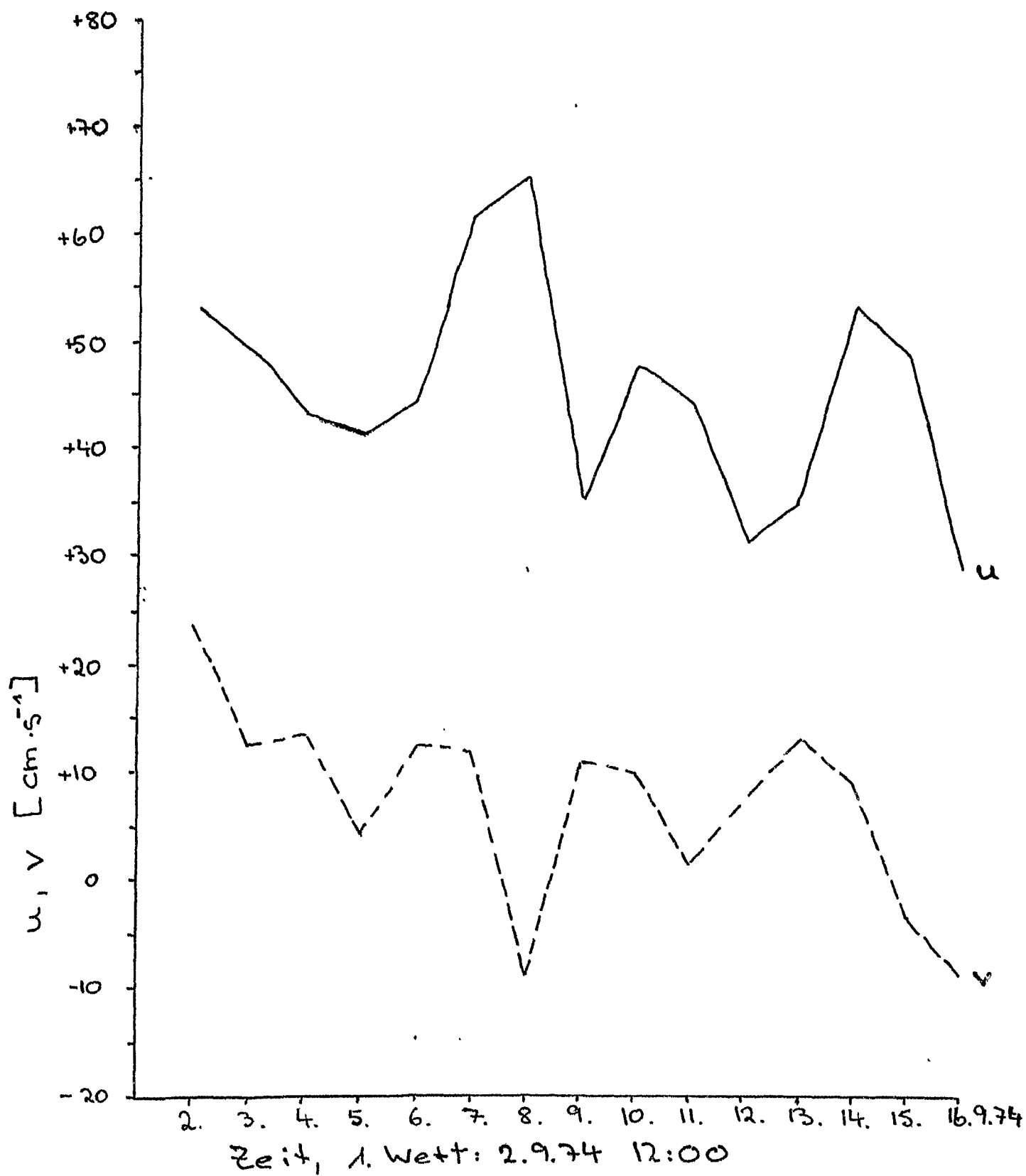


Abb. 14a Strömungskomponenten der Verankerung F1
in 7 m Tiefe

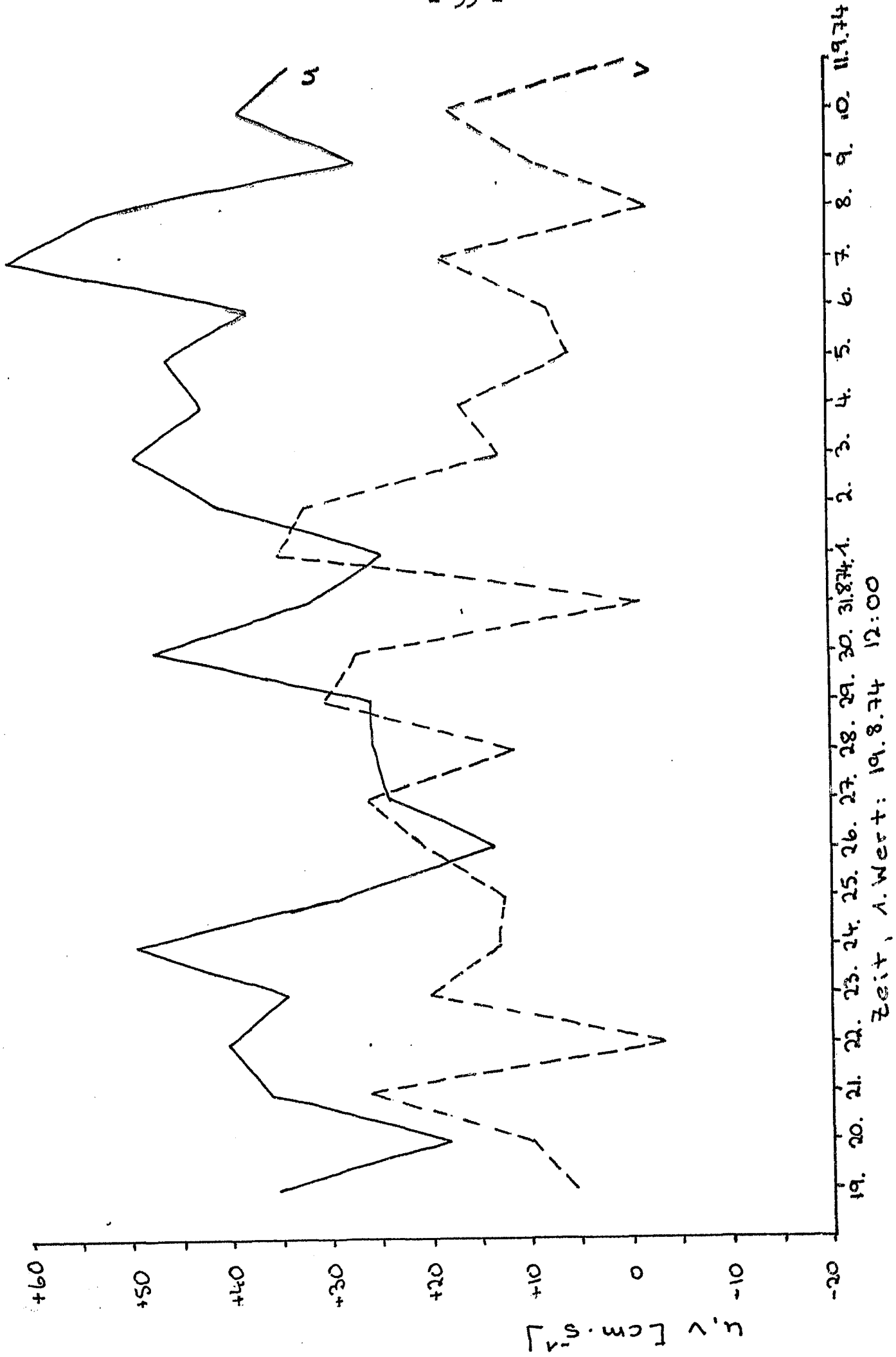
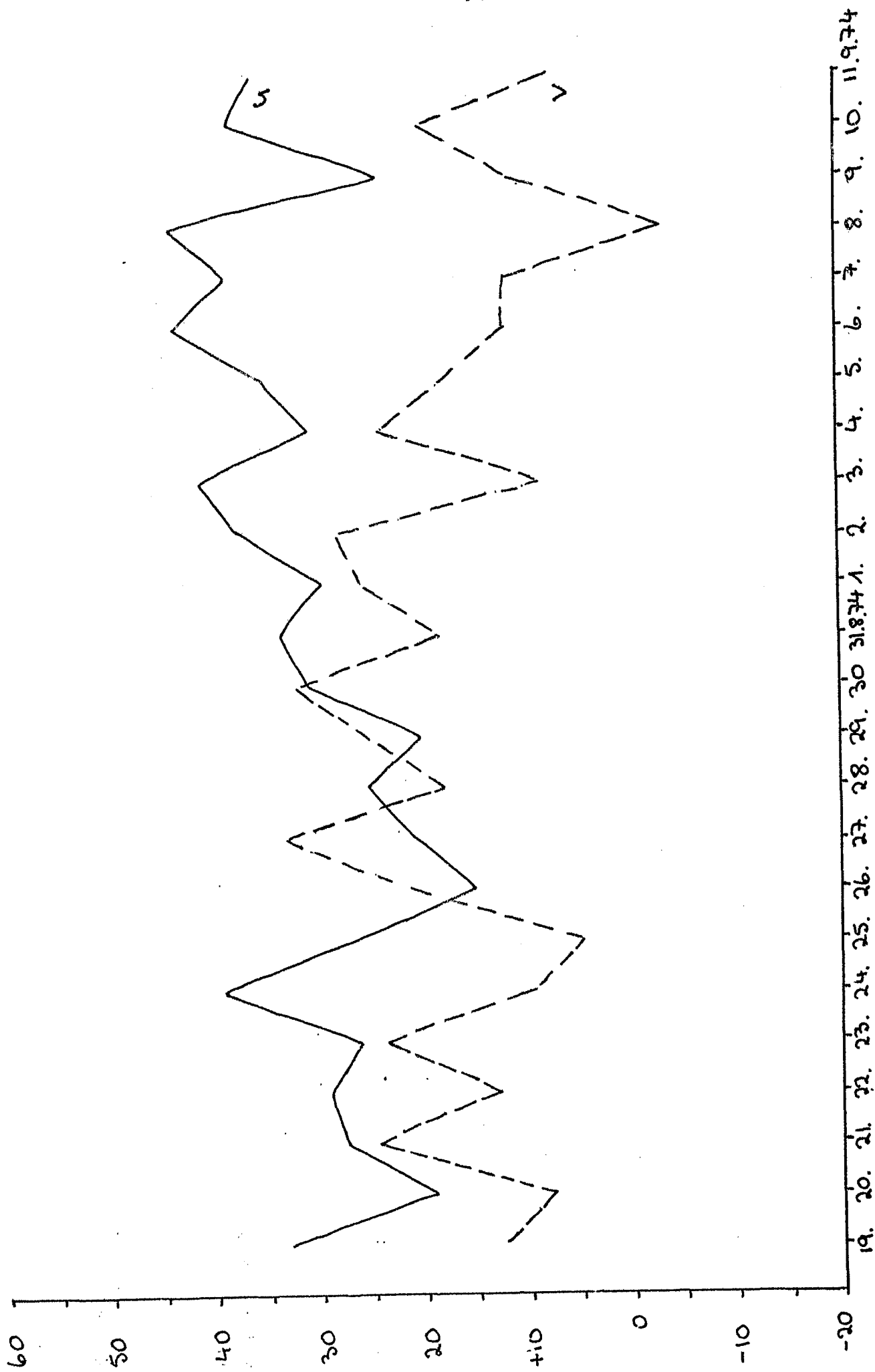


Abb. 14b Strömungskomponenten der Verankerung E3 in 7.6 m Tiefe



Zeit, A. Wert: 19. 8. 74 12:00

Abb. 14c Strömungskomponenten der Verankerung E3 in 21.4 m Tiefe

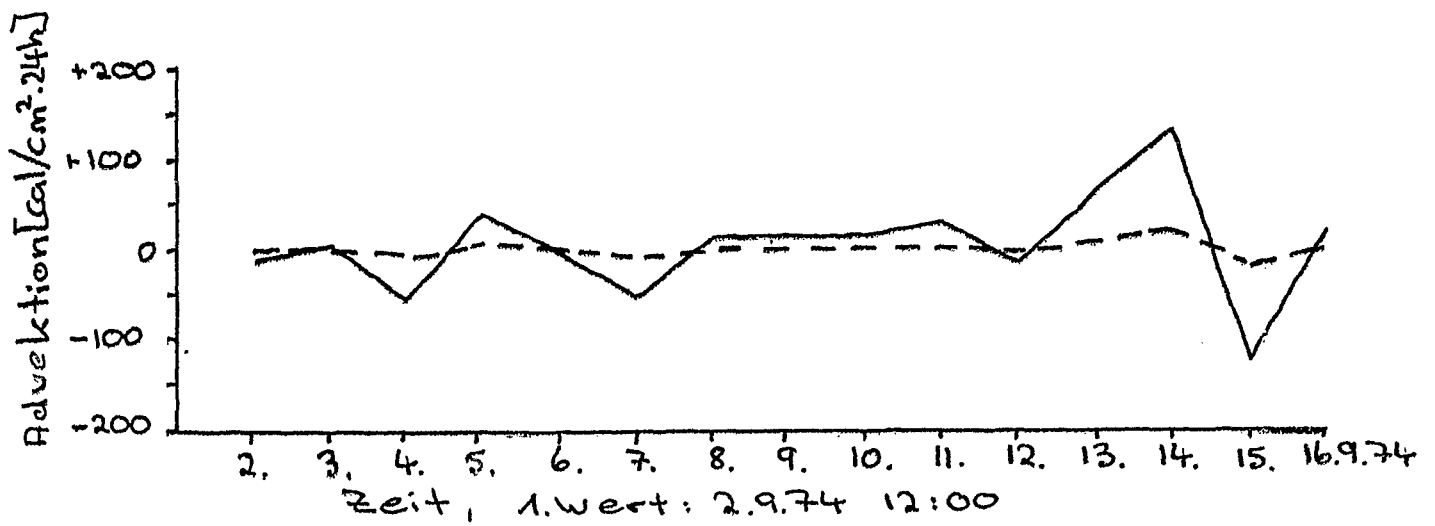


Abb. 15a Direkt berechnete Advektion
Meteor-Quadra

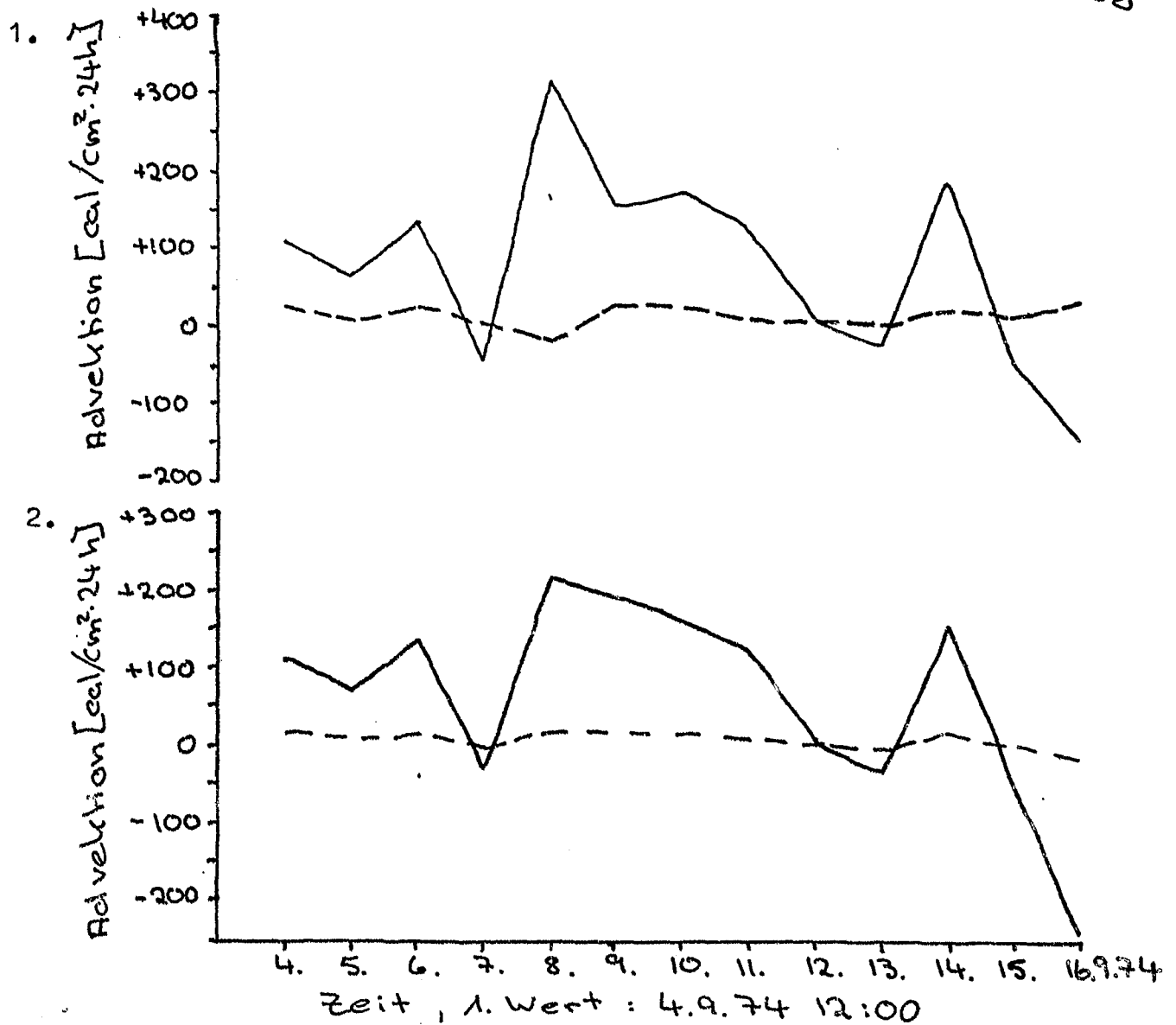


Abb. 15b Direkt berechnete Advektion
Meteor-Planet

- 1. u über 1 Tag gemittelt
- 2. u über 15 Tage gemittelt

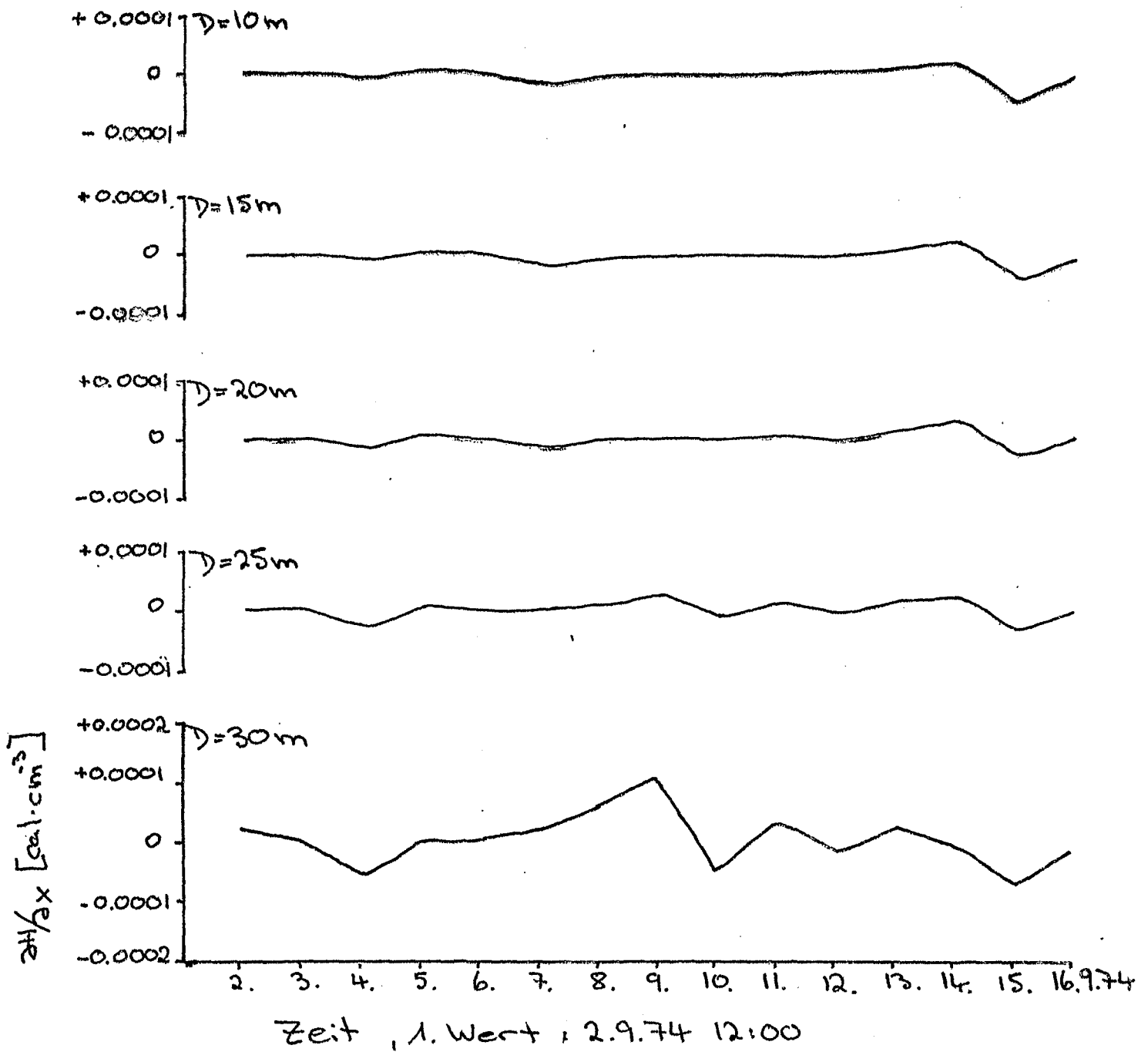


Abb. 16a Die horizontalen Wärmehaltsgradienten
Meteor-Quadra

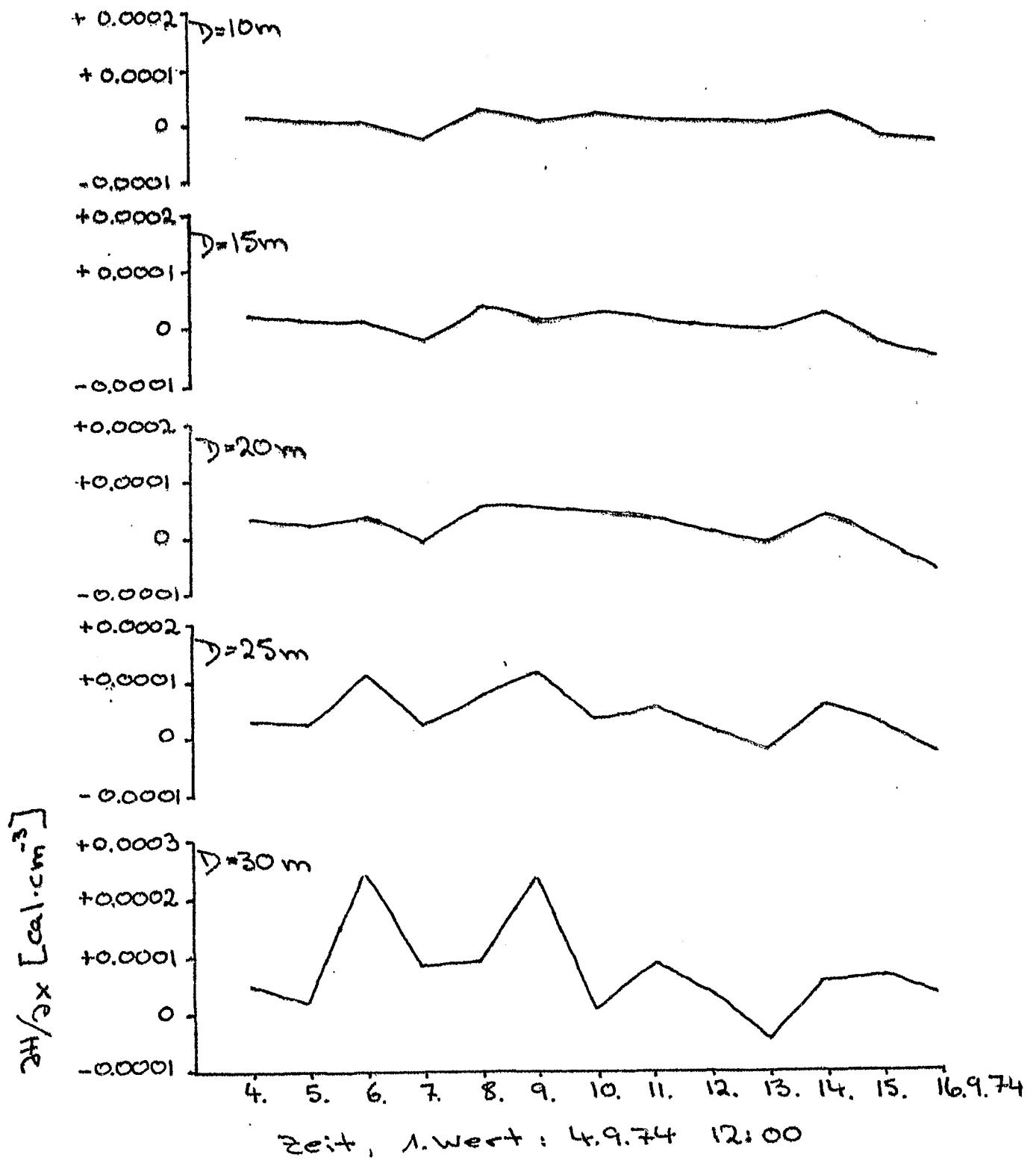


Abb. 16b Die horizontalen Wärmeinhaltsgradienten
Meteor-Planet

6.4. Abschätzung der horizontalen turbulenten Diffusion

Die Größenordnung der turbulenten Diffusionsterme $A_h \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ und $A_h \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}$ wird mit Hilfe der in Kapitel 6.3. bestimmten Gradienten abgeschätzt. Bei den Berechnungen zwischen FS 'Meteor' und FS 'Planet' erhalten wir einen mittleren Gradienten von $10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3}$. Dies würde bei einem meridionalen Abstand von 50km einer Änderung des Wärmeinhalts von $50 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ entsprechen. Bei den Berechnungen für FS 'Meteor' und FS 'Quadra' liegt der mittlere Gradient sogar nur bei $10^{-6} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3}$, der einer Änderung des Wärmeinhalts von $10 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ bei einem meridionalen Abstand von etwa 100km entspricht. Entsprechendes gilt für $\partial H / \partial y$. Auf Grund der verschiedenen Wärmeinhaltsgradienten nehmen die Terme $\partial^2 H / \partial x^2$ und $\partial^2 H / \partial y^2$ eine Größenordnung von $10^{-12} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-4}$ an. Bei einem horizontalen Austauschkoeffizienten $A_h = 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, wie ihn Halpern und Reed für den Golf von Guinea angeben, bleiben die horizontalen turbulenten Diffusionsterme, die von der Größenordnung $10^{-6} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ sind, vernachlässigbar klein gegenüber den advektiven Termen mit einer Größenordnung von 10^{-4} bis $10^{-5} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

7. Die Wärmebilanz der Deckschicht während GATE

Da sowohl die horizontale als auch die vertikale turbulente Diffusion und der vertikale Wärmetransport durch die Integrationstiefe in Folge von internen Wellen aus den vorher genannten Gründen im folgenden vernachlässigt wird, werden in diesem Kapitel nur die lokalen zeitlichen Änderungen des Wärmeinhalts mit der Wärmezufuhr aus der Atmosphäre verglichen, wobei die advektiven Terme im ersten Teil noch nicht berücksichtigt werden.

7.1. Vergleich zwischen der Wärmezufuhr aus der Atmosphäre und der Änderung des Wärmeinhalts

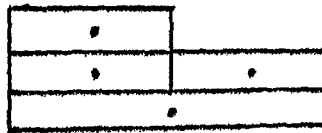
Zunächst werden von diesen beiden Zeitreihen sowohl die Korrelationskoeffizienten als auch die Kohärenz bestimmt. Leider sind auf Grund der 24stündigen Mittlung die Zeitreihen recht kurz geworden, so daß dementsprechend die 95% Konfidenzschwelle sehr hoch liegt und man bei Aussagen über die Signifikanz sehr vorsichtig sein muß. Weiterhin werden bei den Berechnungen verschiedene 24stündige Mittlungsintervalle benutzt, wobei ihr Einfluß auf die ermittelten Korrelationskoeffizienten und Kohärenzen im nächsten Abschnitt behandelt wird.

7.1.1. Der Einfluß verschiedener Mittlungsintervalle

In Tabelle 4 sind die berechneten Korrelationskoeffizienten und Kohärenzen auf Grund von verschiedenen Mittlungsintervallen dargestellt. In den ersten beiden Fällen betrachtet man den gesamten Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre während eines Tages, also von 0:00 GMT bis 24:00 GMT. Dieser wird zuerst mit der Änderung des Wärmeinhalts in 24 Stunden verglichen, der der nullten Stunde zugeordnet wird, da ihm die von 0:00 GMT bis 24:00 GMT gemittelten Wärmeinhalte zu Grunde liegen, die wiederum jeweils der Mittagsstunde zugeordnet werden. Im zweiten Fall reicht das Mittlungsintervall der Wärmeinhalte von 12:00 GMT bis 12:00 GMT, so daß der jeweilige Mittelwert zur nullten Stunde und die Änderung in 24 Stunden zur Mittagsstunde gehört. In den beiden ersten Fällen können atmosphärische Ereignisse den Wärmeinhalt beeinflussen, die in den meteorologischen Daten nicht berücksichtigt werden, da der aus den Mittelwerten berechneten Änderung des Wärmeinhalts ein Zeitraum von 48 Stunden zu Grunde liegt im Gegensatz zu 24 Stunden der atmosphärischen Größen. Im dritten Fall soll nun diese Diskrepanz insofern berücksichtigt werden, als daß der Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre ebenfalls über 48 Stunden betrachtet wird und die Hälfte davon einer Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche in 24 Stunden entspricht.

Das folgende Bild erläutert die Wahl der Intervalle für die drei betrachteten Fälle. Der jeweils obere Kasten überdeckt den Zeitraum, in dem der Wärmeaustausch durch die Meeresoberfläche betrachtet wird. Die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre während dieser 24 bzw. 48 Stunden wird dem Zeitpunkt zugeordnet, der in dem Kasten durch einen Punkt gekennzeichnet ist. Die jeweils mittleren Kästen bezeichnen das Mittlungsintervall für die Wärmeinhalte, wobei der Mittelwert wiederum dem durch den Punkt im Kasten gekennzeichneten Zeitpunkt zugeordnet wird. Die Änderung des Wärmeinhalts in 24 Stunden berechnet sich aus der Differenz der Mittelwerte, so daß ihr ein Zeitraum von 48 Stunden zu Grunde liegt. Der der Änderung des Wärmeinhalts zugeordnete Zeitpunkt wird jeweils durch die Punkte in den unteren Kästen bezeichnet.

1. Fall



Wärmezufuhr aus der Atmosphäre

Wärmeinhalt

Änderung des Wärmeinhalts

2. Fall

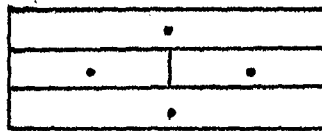


Wärmezufuhr aus der Atmosphäre

Wärmeinhalt

Änderung des Wärmeinhalts

3. Fall



Wärmezufuhr aus der Atmosphäre

Wärmeinhalt

Änderung des Wärmeinhalts

12⁰⁰ 0⁰⁰ 12⁰⁰ 0⁰⁰ 12⁰⁰ 0⁰⁰

In Tabelle (4a) sind die Korrelationskoeffizienten für verschiedene Integrationstiefen, die in der ersten Spalte angegeben sind, verzeichnet. Bei den berechneten Kohärenzen, die ebenfalls für unterschiedliche Integrationstiefen in Tabelle 4b dargestellt sind, reichen die betrachteten Perioden auf Grund der 24stündigen Mittlung von 54,86 Stunden bis 192 Stunden. Neben der Kohärenz befindet sich die jeweilige Angabe der Phase, und außerdem ist für jede Berechnung die 95%-Vertrauensgrenze angegeben. Die besten Ergebnisse bezüglich der Korrelation der beiden Zeitreihen erhält man wie erwartet im zweiten Fall, da hier das Mittlungsintervall der Wärmeinhalte am günstigsten gelegt wurde. Während man im ersten Fall die letzten 24 Stunden, für die der Wärmeinhalt berechnet wird und somit für dessen Änderung eine wesentliche Rolle spielen, in den meteorologischen Größen nicht berücksichtigt, werden im dritten Fall die gesamten 48 Stunden betrachtet, wobei die atmosphärischen Einflüsse der letzten Stunden sich erst im Wärmeinhalt der darauffolgenden 24 Stunden bemerkbar machen. Bei der Netto-Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche werden also meteorologische Ereignisse berücksichtigt, die im Wärmehaushalt noch keine Rolle spielen. Diese Verzögerung erkennt man ebenfalls in den Korrelationsberechnungen direkt zwischen dem Wärmeinhalt und dem Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten bzw. Kohärenzen sind analog zu den vorherigen in Tabelle 5 dargestellt. Bei einer gegenseitigen Verschie-

bung der betrachteten Zeitintervalle um 12 Stunden erhält man hierbei die besten Ergebnisse. Auffällig ist, daß in allen Fällen bei langen Perioden keine Korrelationen zwischen den Zeitreihen vorhanden sind, während bei kurzen Perioden die Kohärenz teilweise deutlich über der 95% Vertrauensgrenze liegt.

Bei diesen Ergebnissen kann man davon ausgehen, daß Korrelationen zwischen dem Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und dem Wärmeinhalt der Deckschicht bzw. dessen Änderung vorhanden sind. Gleichzeitig erkennt man auch, daß die advektiven Terme oftmals eine entscheidende Rolle in der Wärmebilanzgleichung spielen und somit nicht zu vernachlässigen sind.

Tabelle 4a

Korrelationskoeffizienten für den Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre Q_N und die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts $\partial H / \partial t$

1. Q_N - $\partial H / \partial t$
 1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 3.9.74 0:00
2. Q_N - $\partial H / \partial t$
 1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 2.9.74 12:00
3. Q_N - $\partial H / \partial t$
 1. Wert: 3.9.74 0:00 1. Wert: 3.9.74 0:00

	1.	2.	3.
D = 10m	+ 0.312	+ 0.708	+ 0.433
15m	+ 0.231	+ 0.649	+ 0.380
20m	+ 0.180	+ 0.599	+ 0.358
25m	+ 0.332	+ 0.536	+ 0.431

Tabelle 4b

Kohärenz für den Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre Q_N und die zeitliche Änderung des Wärmeinhalts $\partial H / \partial t$

1. Q_N - $\partial H / \partial t$
 1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 3.9.74 0:00
2. Q_N - $\partial H / \partial t$
 1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 2.9.74 12:00
3. Q_N - $\partial H / \partial t$
 1. Wert: 3.9.74 0:00 1. Wert: 3.9.74 0:00

Darstellung der Kohärenz und Phase

95% Vertrauensgrenze		Periode in Stunden					
		54.86	64	76.8	96	128	192
1.	D=10m	0.71 253	0.72 304	0.82 322	0.81 324	0.81 312	0.79 284
	15m	0.76 253	0.73 300	0.81 318	0.81 320	0.84 310	0.76 276
	20m	0.82 259	0.80 294	0.85 310	0.87 314	0.90 309	0.61 269
	25m	0.79 285	0.86 304	0.91 324	0.95 334	0.89 340	0.44 350
2.	D=10m	0.99 23	0.99 19	0.93 14	0.86 1	0.91 346	0.88 323
	15m	0.99 23	0.98 20	0.91 14	0.84 0	0.90 344	0.70 314
	20m	0.98 24	0.98 20	0.90 13	0.84 0	0.86 345	0.40 291
	25m	0.86 57	0.99 49	0.95 38	0.90 32	0.78 26	0.70 127
3.	D=10m	0.63 355	0.87 12	0.80 19	0.71 9	0.78 348	0.84 322
	15m	0.71 352	0.87 9	0.78 15	0.71 6	0.80 348	0.77 315
	20m	0.86 352	0.90 2	0.82 6	0.78 0	0.84 351	0.52 309
	25m	0.96 3	0.90 13	0.91 19	0.90 22	0.83 26	0.39 43

Tabelle 5a

Korrelationskoeffizienten für den Netto-Wärmeaustausch mit der
Atmosphäre Q_N und den Wärmehalt H

1. Q_N - H
1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 2.9.74 12:00
2. Q_N - H
1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 3.9.74 0:00

	1.	2.
D = 10m	+ 0.155	+ 0.469
15m	+ 0.177	+ 0.407
20m	+ 0.196	+ 0.366
25m	+ 0.145	+ 0.315

Tabelle 5b

Kohärenz für den Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre Q_N und den Wärmeinhalt H

1. Q_N - H
 1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 2.9.74 12:00

2. Q_N - H
 1. Wert: 2.9.74 12:00 1. Wert: 3.9.74 0:00

Darstellung der Kohärenz und Phase

95% Vertrauens- grenze		Periode in Stunden											
		54.86		64		76.8		96		128		192	
1.	D=10m	0.75	59	0.80	92	0.86	106	0.68	87	0.71	62	0.42	10
	15m	0.80	57	0.82	88	0.85	101	0.69	84	0.64	63	0.28	316
	0.83564 20m	0.86	58	0.87	83	0.89	92	0.79	81	0.43	73	0.35	277
	25m	0.79	75	0.93	95	0.96	105	0.94	107	0.54	122	0.35	262
2.	D=10m	0.95	41	0.98	46	0.95	45	0.92	33	0.93	22	0.55	334
	15m	0.96	41	0.98	46	0.93	45	0.91	32	0.76	15	0.42	295
	0.83564 20m	0.95	42	0.98	46	0.93	44	0.91	32	0.45	3	0.45	272
	25m	0.84	75	0.99	75	0.97	71	0.92	66	0.25	57	0.45	266

7.1.2. Vergleich der linearen Trends

Im folgenden Abschnitt soll nun ein linearer Trend untersucht werden, der sowohl in der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche als auch im Wärmeinhalt der Deckschicht deutlich erkennbar ist. Bei FS 'Meteor' nehmen beide Größen während der ersten und dritten Phase ab, während sie dazwischen in der zweiten Meßphase wieder ansteigen (Abb. 6 und 7).

Zur Bestimmung des linearen Trends wird durch die Zeitreihe eine Ausgleichsgerade nach der Methode der kleinsten Quadrate gelegt. Die Geradengleichung lautet dann folgendermaßen:

$$y = m_s \cdot t + b$$

$$m_s = \frac{\sum_{t=1}^N t \cdot \bar{F}_t - \bar{F} \cdot \frac{N}{2} (N+1)}{\frac{N}{12} (N^2 - 1)}$$

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \bar{F}_t, \quad b = \bar{F} - m_s \cdot \frac{(N+1)}{2}$$

wobei m_s die Steigung der Geraden, \bar{F} der Mittelwert der Zeitreihe und b der Wert der Geraden zur Anfangszeit bedeuten.

Die Ergebnisse sind in Tab. 6 dargestellt. Betrachtet man den linearen Trend des Wärmeinhalts, so fällt auf, daß die Neigung mit steigender Integrationstiefe betragsmäßig meist größer wird. Dies ist einfach dadurch zu erklären, daß bei größeren Integrationstiefen zu dem Wärmeverlust bzw. -gewinn in den oberen Metern zusätzlich der in der darunterliegenden Schicht kommt. Bei vernachlässigbarer Advektion und turbulenter Diffusion ist ja die Änderung des Wärmeinhalts bei einer Integrationstiefe von 20m mindestens ebenso groß wie bei einer Tiefe von 10m. Ein Vergleich zwischen den Forschungsschiffen 'Meteor' und 'Quadra' während der dritten Meßphase ergibt, daß die linearen Trends der Wärmeinhalte nahezu identisch sind und bezüglich der Messungen von FS 'Planet' zumindest die gleiche Größenordnung haben (Tab. 6c). Während der ersten Phase ergibt sich allerdings ein völlig anderes Bild, da nun die Schiffe 'Meteor' und 'Quadra' nicht in Stromrichtung hintereinander liegen. Im Gegensatz zu den Messungen bei FS 'Meteor' steigt während dieses Zeitraums

der Wärmeinhalt bei dem kanadischen Forschungsschiff.

Bei den Änderungen des Wärmeinhalts in 24 Stunden ist der lineare Trend meist nicht so deutlich erkennbar, und die Werte liegen dementsprechend niedriger (Tab. 6). In der ersten und dritten Meßphase herrscht eine ansteigende Tendenz, während in der zweiten Phase ein Abfall zu verzeichnen ist. Auch in diesem Fall sind die Ergebnisse der Schiffe 'Meteor' und 'Quadra' während der letzten Phase nahezu identisch, bei FS 'Planet' ist der Anstieg allerdings wesentlich größer. Es wäre zu erwarten gewesen, daß der langzeitige Trend der Änderung des Wärmeinhalts mit dem des Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre übereinstimmt. Als Ergebnis erhalten wir aber geradezu einen entgegengesetzten Verlauf, da die Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche nur während der zweiten Meßphase eine ansteigende Tendenz zeigt und während der übrigen Meßphasen abfällt (Tab. 6). Interessant erscheint weiterhin, daß während der dritten Phase der Wärmeinhalt abnimmt, obwohl die meiste Zeit Wärme aus der Atmosphäre dem Meer zugeführt wird.

Eine mögliche Erklärung für diese beiden Diskrepanzen liegt in der Advektion, die somit kühleres Wasser aus der südwestlichen Region mit sich bringen müßte, um eine Abnahme des Wärmeinhalts zu bewirken. Die entspräche auch etwa den mittleren Oberflächentemperaturen. Da die Änderung des Wärmeinhalts ansteigt, verringert sich die Abnahme des Wärmeinhalts während der dritten Meßphase und er steigt am Ende sogar wieder leicht an. Möglicherweise liegt dort eine Abnahme der Advektion von kälterem Wasser zu Grunde.

Tabelle 6

Der langzeitige lineare Trend der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche, des Wärmeinhalts und dessen Änderung

a) Phase I

Steigung des linearen Trends

		Meteor	Quadra
Wärmeinhalt (cal/cm ² .24h)	D=10m		+ 56.585
	15m		+ 73.822
	20m	- 34.708	+ 78.867
	25m	- 22.155	+ 96.419
	30m	- 26.346	+108.520
Änderung des Wärmeinhalts in 24 Stunden (cal/cm ² .24h/24h)	D=20m	+ 15.237	
	25m	+ 42.428	
	30m	+ 80.916	
Wärmezufuhr durch die Meeresober- fläche (cal/cm ² .24h/24h)		- 0.014464	

b) Phase II

Steigung des linearen Trends

		Meteor
Wärmeinhalt (cal/cm ² ·24h)	D=20m	+ 42.891
	25m	+ 50.223
	30m	+ 56.289
Änderung des Wärmeinhalts in 24 Stunden (cal/cm ² ·24h/24h)	20m	- 3.8542
	25m	- 4.7014
	30m	- 6.0694
Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche (cal/cm ² ·24h/24h)		+ 0.014516

c) Phase III

Steigung des linearen Trends

		Meteor	Planet	Quadra
Wärmeinhalt (cal/cm ² ·24h)	D=10m	-21.529	-12.563	-16.804
	15m	-31.045	-17.059	-31.870
	20m	-40.966	-21.373	-46.878
	25m	-56.775	-34.975	-61.002
	30m	-90.746	-58.723	-72.956
Änderung des Wärmeinhalts in 24 Stunden (cal/cm ² ·24h/24h)	D=10m	+3.7282	+12.248	+3.2509
	15m	+4.1542	+17.736	+4.2443
	20m	+4.3183	+24.346	+4.4563
	25m	+5.5228	+26.138	+6.1392
	30m	+7.1441	+19.496	+7.7569
Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche (cal/cm ² ·24h/24h)		-7.3559		

7.1.3. Untersuchung eines kurzen Zeitraums mit besonders starker Einstrahlung

Weiterhin soll untersucht werden, ob die advektiven Terme vielleicht für solche Einzelergebnisse vernachlässigt werden können, bei denen die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre besonders groß ist. Dazu wurde der Zeitraum vom 9.9.74 bis zum 12.9.74 näher betrachtet, der dafür besonders geeignet erscheint (Abb. 17). Während am 9.9.74 die Einstrahlung ein Minimum hat, so daß der Wärmeverlust an die Atmosphäre etwa $-50 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$ beträgt, steigt die Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche am 10.9.74 und 11.9.74 auf knapp $400 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$ an, um am 12.9.74 wieder auf ein Minimum von $-125 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$ abzufallen. Für diesen kurzen Zeitraum werden nun die stündlichen Werte der meteorologischen Größen mit denen der Wärmeinhalte und dessen Änderungen verglichen. Im Gegensatz zu den ozeanographischen Parametern ist bei dem Netto-Wärmeaustausch mit der Atmosphäre ein deutlicher Tagesgang erkennbar (Abb. 17a). Bei der Betrachtung der stündlichen Temperaturprofile erkennt man, daß die Oberflächentemperatur sich bis zum 10.9.74 18:00 GMT kaum ändert, dann aber sprunghaft um 0.5°C ansteigt und ab 0:00 GMT um 0.3°C wieder absinkt. Die Reaktion des Meeres auf die neuen Einstrahlungsverhältnisse war also recht langsam, wenn nicht andere Ursachen einen Temperaturanstieg unterdrückten. Am 11.9.74 steigt die Oberflächentemperatur von 9:00 GMT bis 15:00 GMT um 0.55°C und in der darauffolgenden Nacht fällt sie wieder um 0.4°C . Auch am nächsten Tag, den 12.9.74 ist ein Rückgang der Temperatur um circa 0.25°C zu verzeichnen. Analog zu diesen Temperaturschwankungen verläuft der Wärmeinhalt, der mit seiner stündlichen Änderung in Abb. 17 b und c dargestellt ist. Der Vergleich mit der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche ergibt, daß der Wärmeinhalt weniger durch kurzfristige, lokale atmosphärische Einflüsse bestimmt wird, sondern daß die großräumigen, längerfristigen meteorologischen Ereignisse eine wichtige Rolle spielen. Demzufolge sind die advektiven Terme wohl nicht vernachlässigbar und sie müssen, wie man bei den vorangegangenen Betrachtungen auch schon erkennen konnte, bei den Wärmehaushaltsbestimmungen berücksichtigt werden.

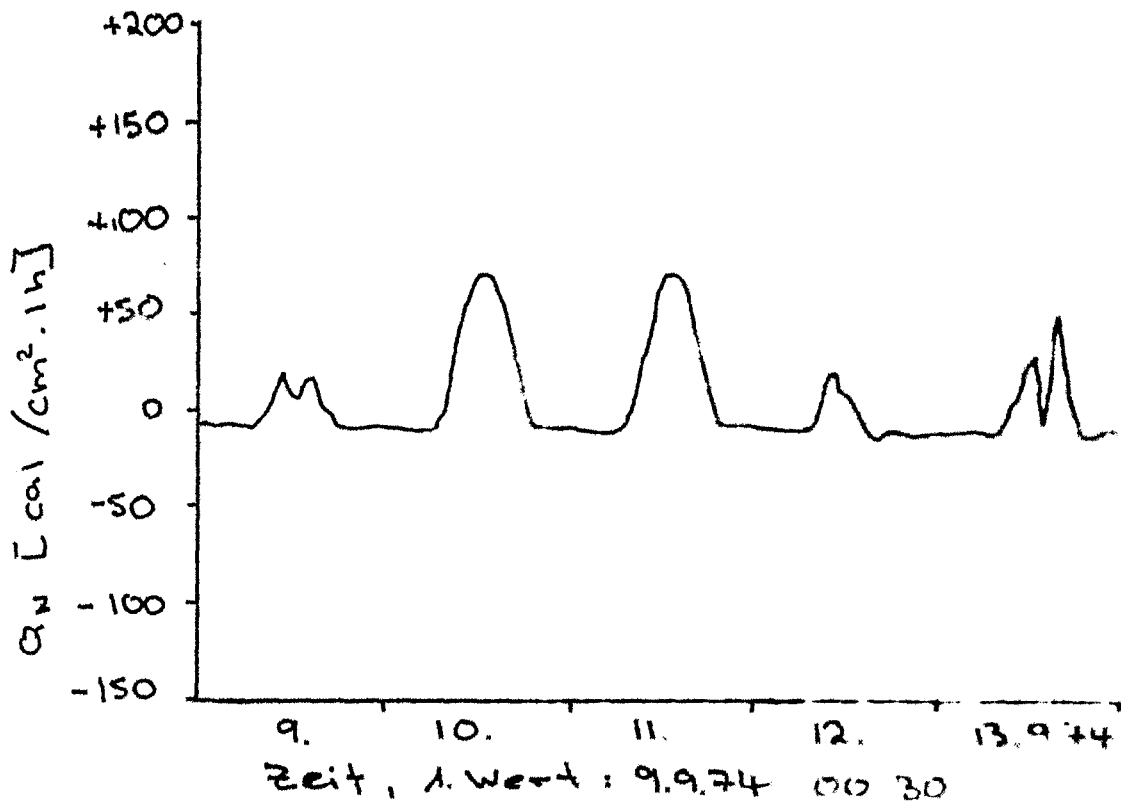


Abb. 17a Wärmeaustausch durch die Meeresoberfläche

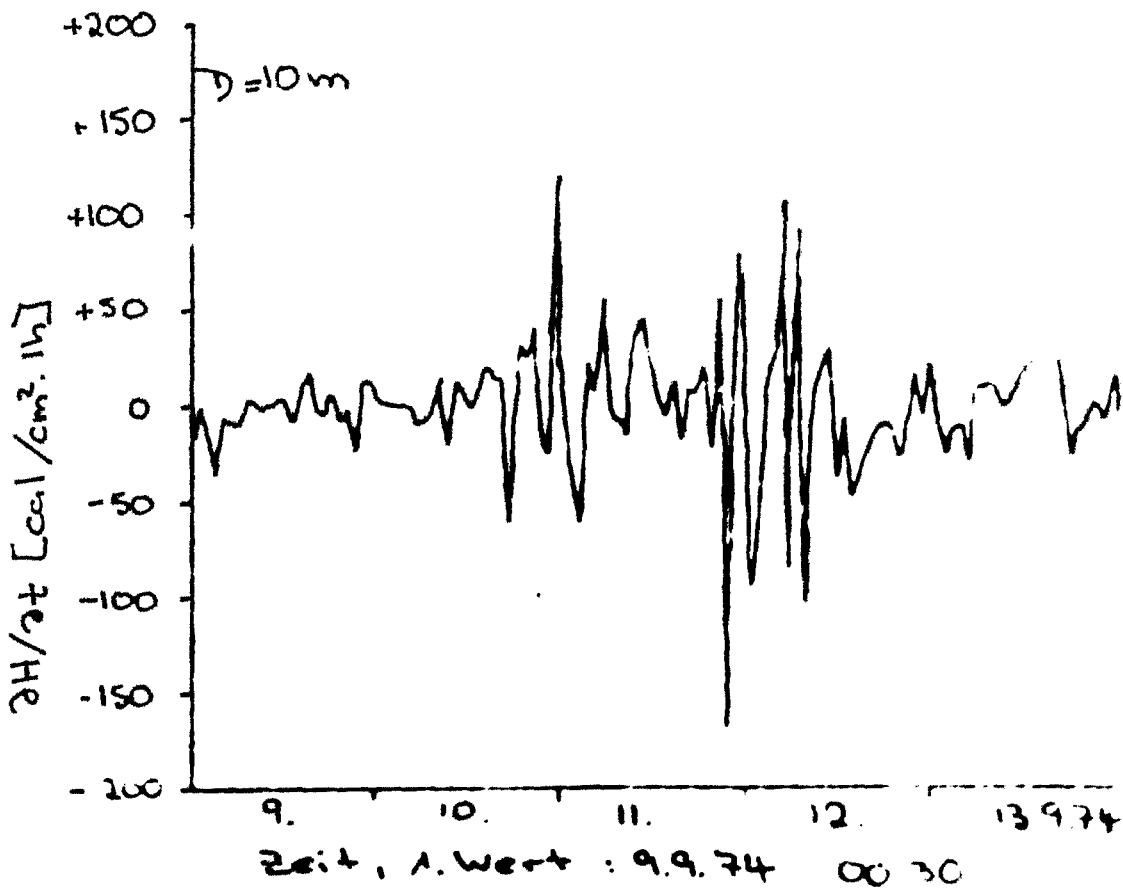


Abb. 17b Änderung des Wärmehalts
Meteor

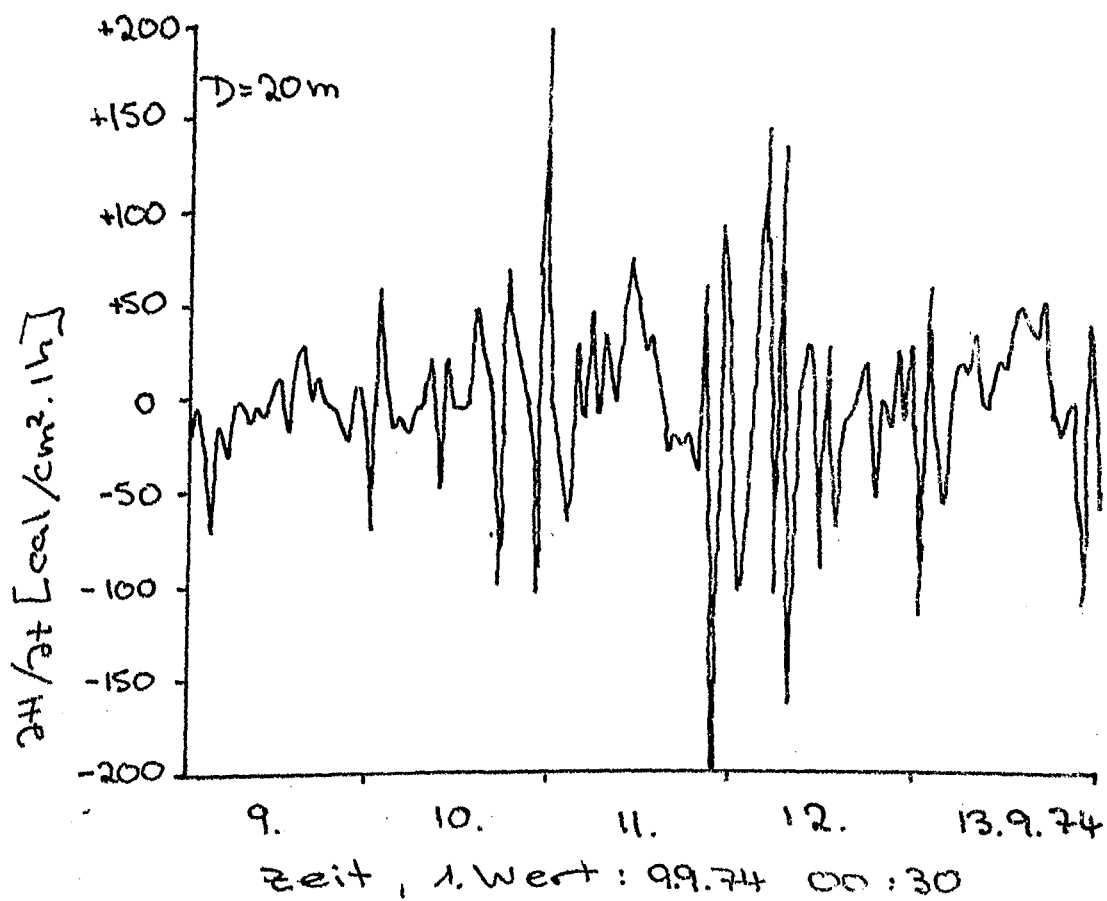
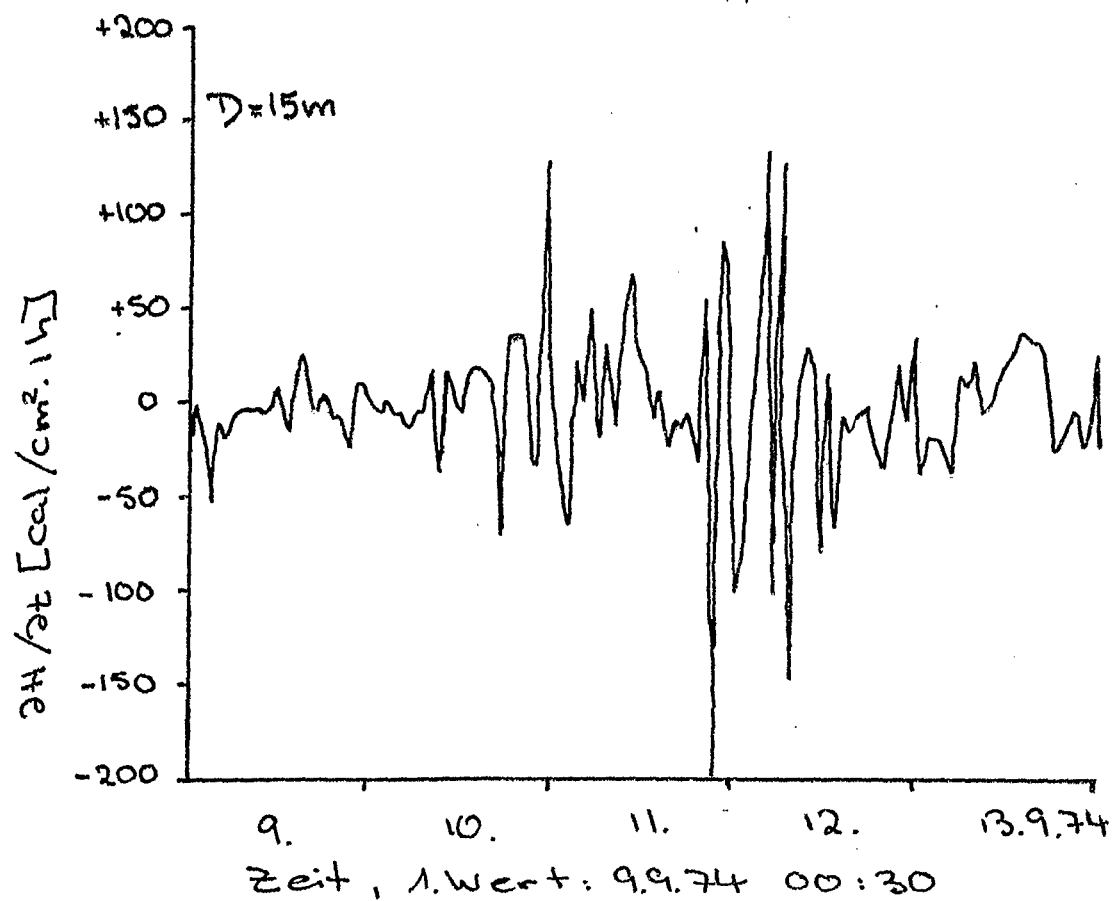


Abb. 17b Änderung des Wärmeinhalts
Meteor

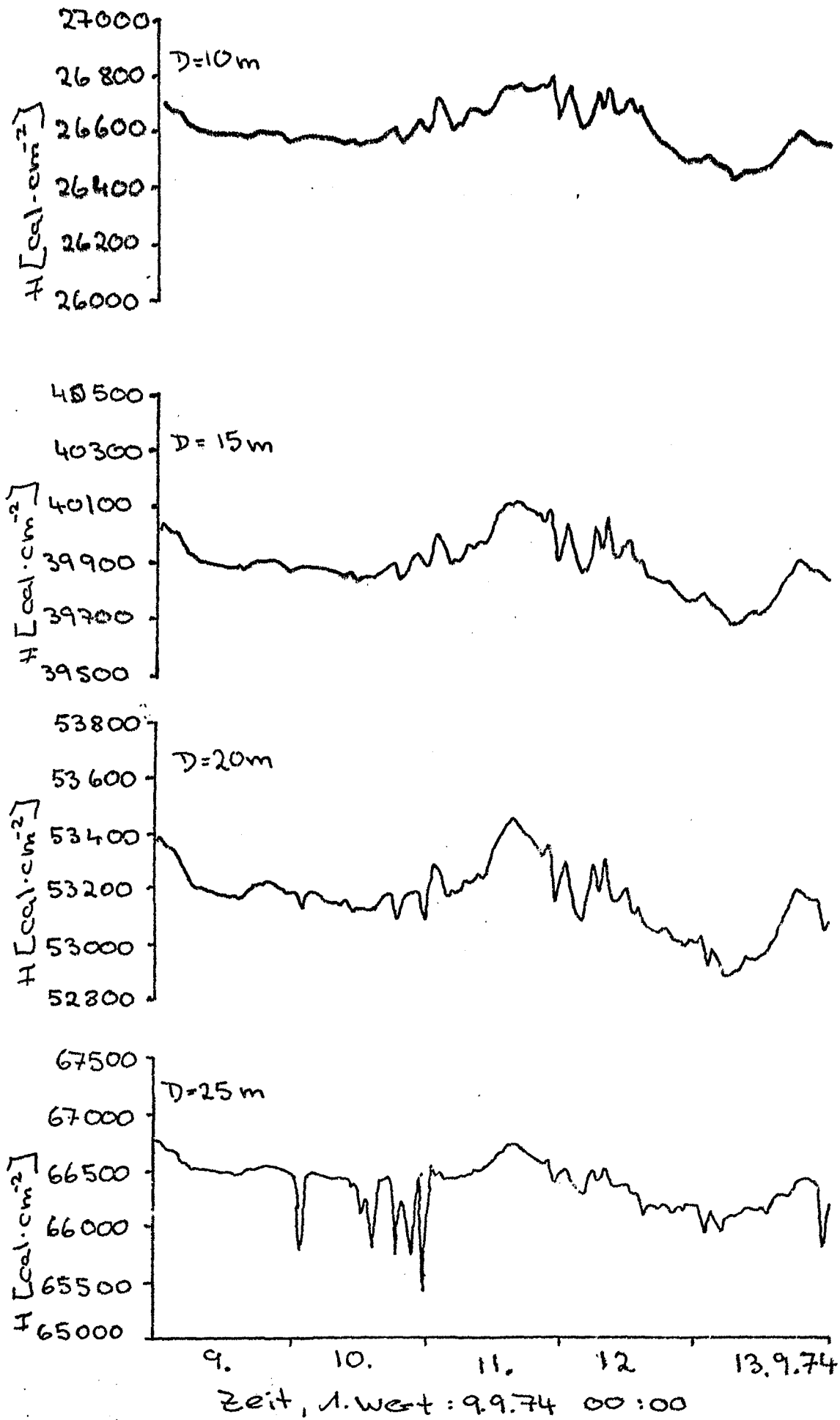


Abb. 17c Wärmeinhalte, Meteor

7.2. Vergleich der direkt und indirekt berechneten Advektion

In den vorausgehenden Kapiteln erkennt man die enorme Bedeutung der advektiven Terme bezüglich des Wärmehaushalts. In diesem Teil soll nun ein Vergleich zwischen den direkt und indirekt berechneten advektiven Termen stattfinden. In Abb. 18 sind sie für verschiedene Integrationstiefen verzeichnet, wobei die direkte Berechnung einmal auf den Wärmehaltsgradienten zwischen FS 'Meteor' und 'Quadra' und ein anderes Mal auf denen zwischen FS 'Meteor' und WFS 'Planet' basieren. Die indirekt berechneten advektiven Terme stellen den sogenannten Sollwert der Advektion dar, wobei der Wärmetransport durch die Untergrenze und die horizontale turbulente Diffusion vernachlässigt wird. Die Differenz der verschieden berechneten Terme, die die eigentliche Gesamtbilanz des Wärmehaushalts darstellt, ist auf die oben genannten Vernachlässigungen und die Ungenauigkeit der direkten Berechnung zurückzuführen. In Abb. 19, in der einmal die direkten Berechnungen auf Messungen von FS 'Meteor' und WFS 'Planet' basieren, beträgt die mittlere Differenz bei einer Integrationstiefe von 20 m etwa $50 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$, im Gegensatz zu $115 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$ auf Grund der Messungen von FS 'Meteor' und 'Quadra'. Die maximalen Abweichungen liegen bei $400 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$. Die Unterschiede zwischen der direkt und indirekt berechneten Advektion sind also recht erheblich. Leider ist auf Grund des vorliegenden Datensatzes keine genauere direkte Berechnung der Advektion möglich, die aber für eine bessere Wärmehaushaltsbestimmung unerlässlich wäre.

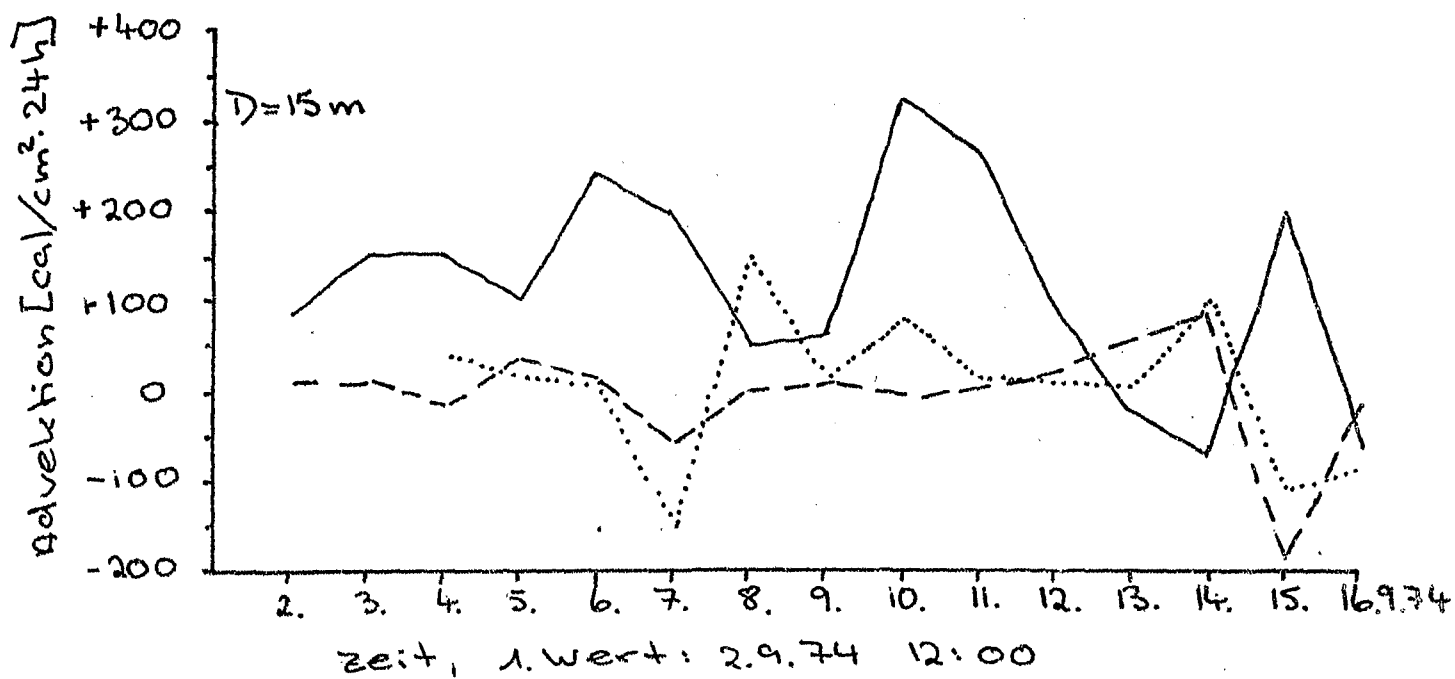
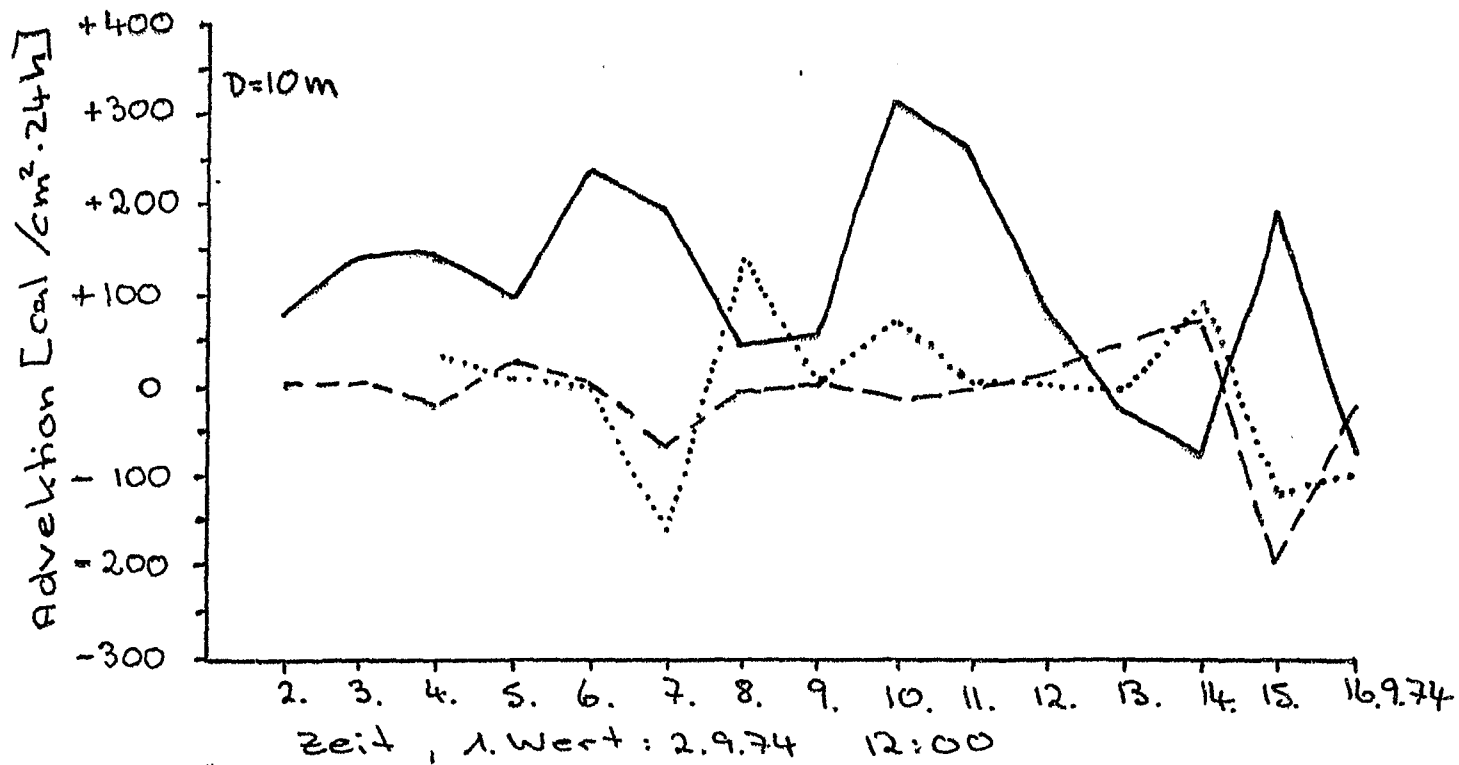


Abb. 18. Vergleich der direkt und indirekt berechneten Advektion

- $Q_n - \partial H / \partial t$ Meteor
- $u \cdot \partial H / \partial x$ Meteor-Planet
- - - - $u, \partial H / \partial x$ Meteor-Quadra

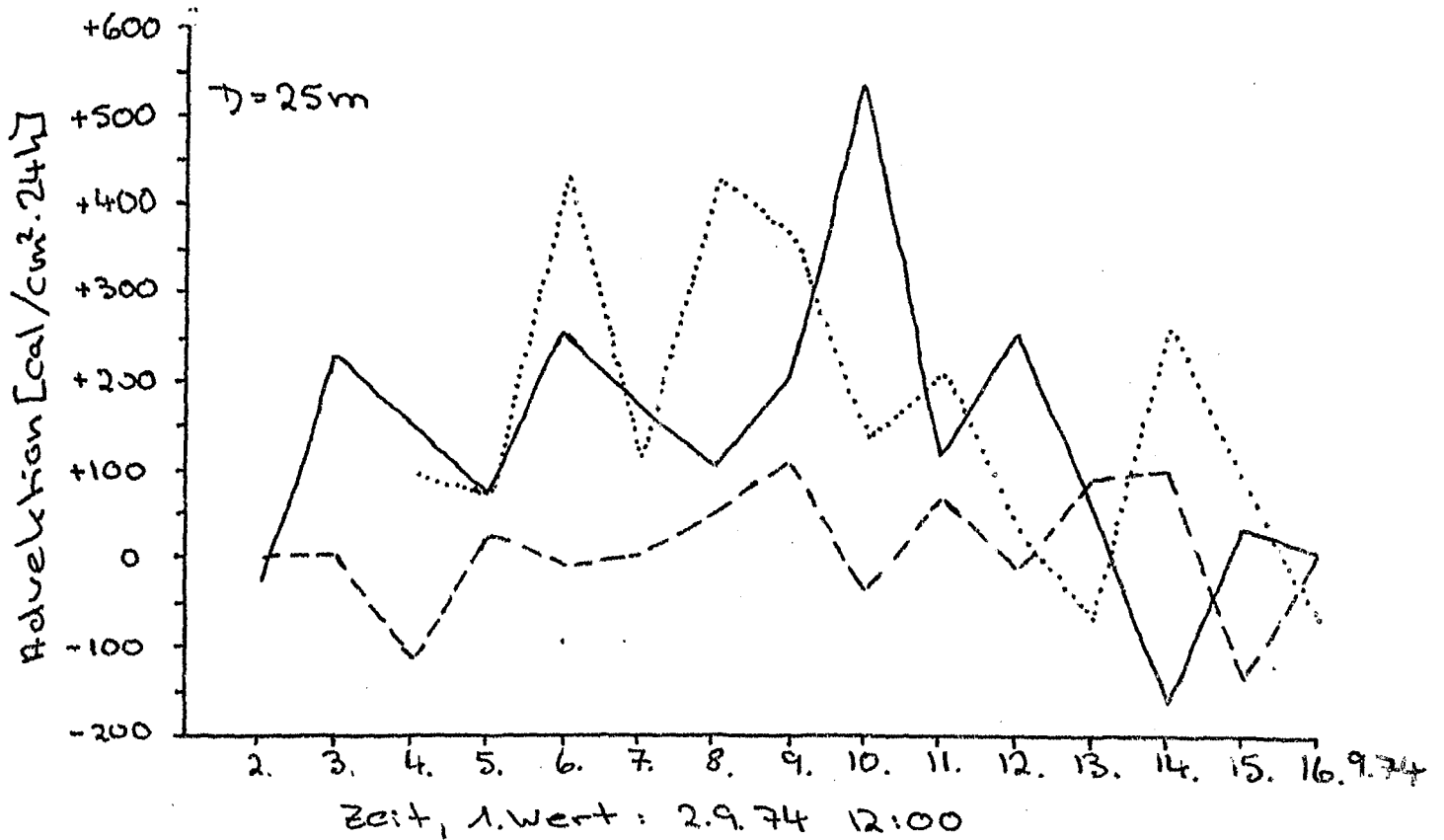
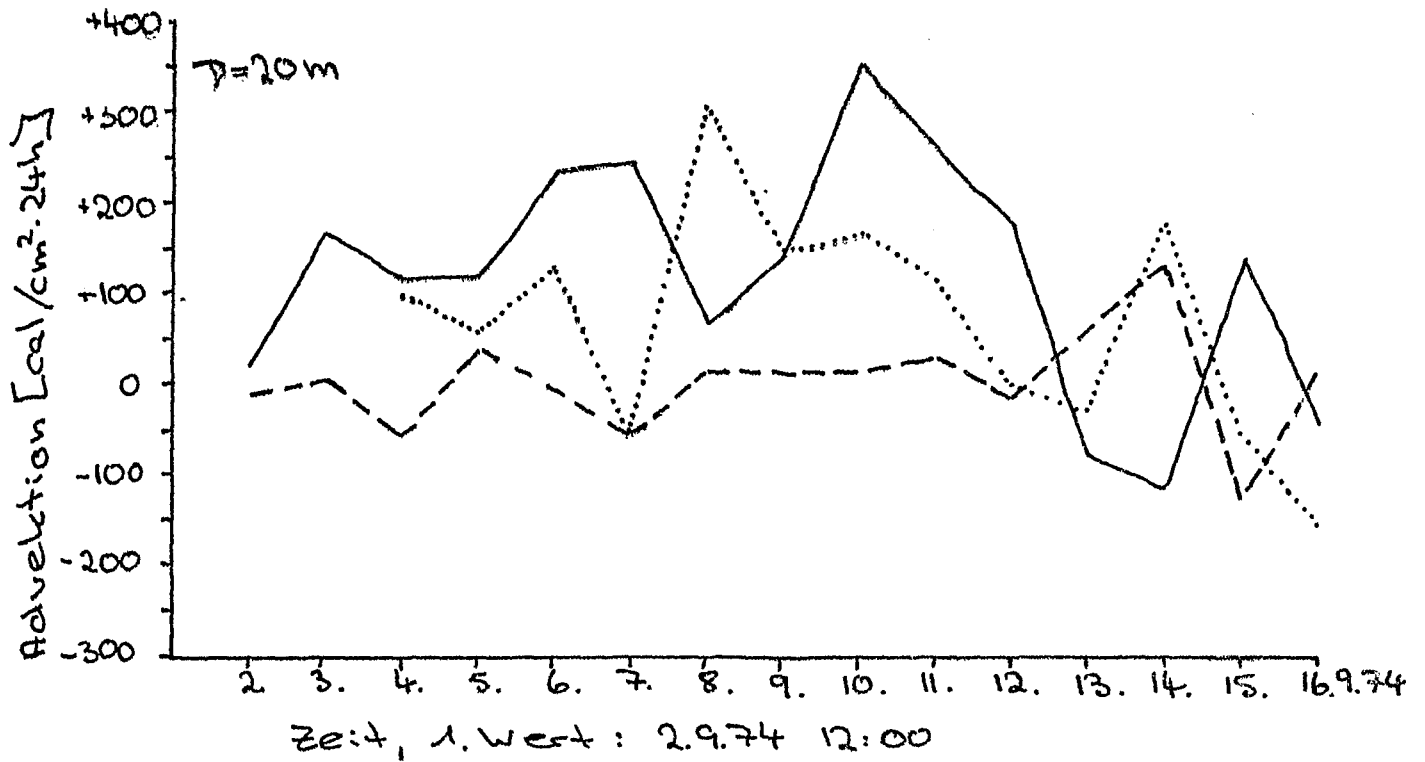


Abb. 18 Vergleich der direkt und indirekt berechneten Advektion

$Q_n - 24/\text{st}$ Meteor
 $u \cdot 24/\text{st} \cdot x$ Meteor-Planet
 $u \cdot 24/\text{st} \cdot n$ Meteor-Quadra

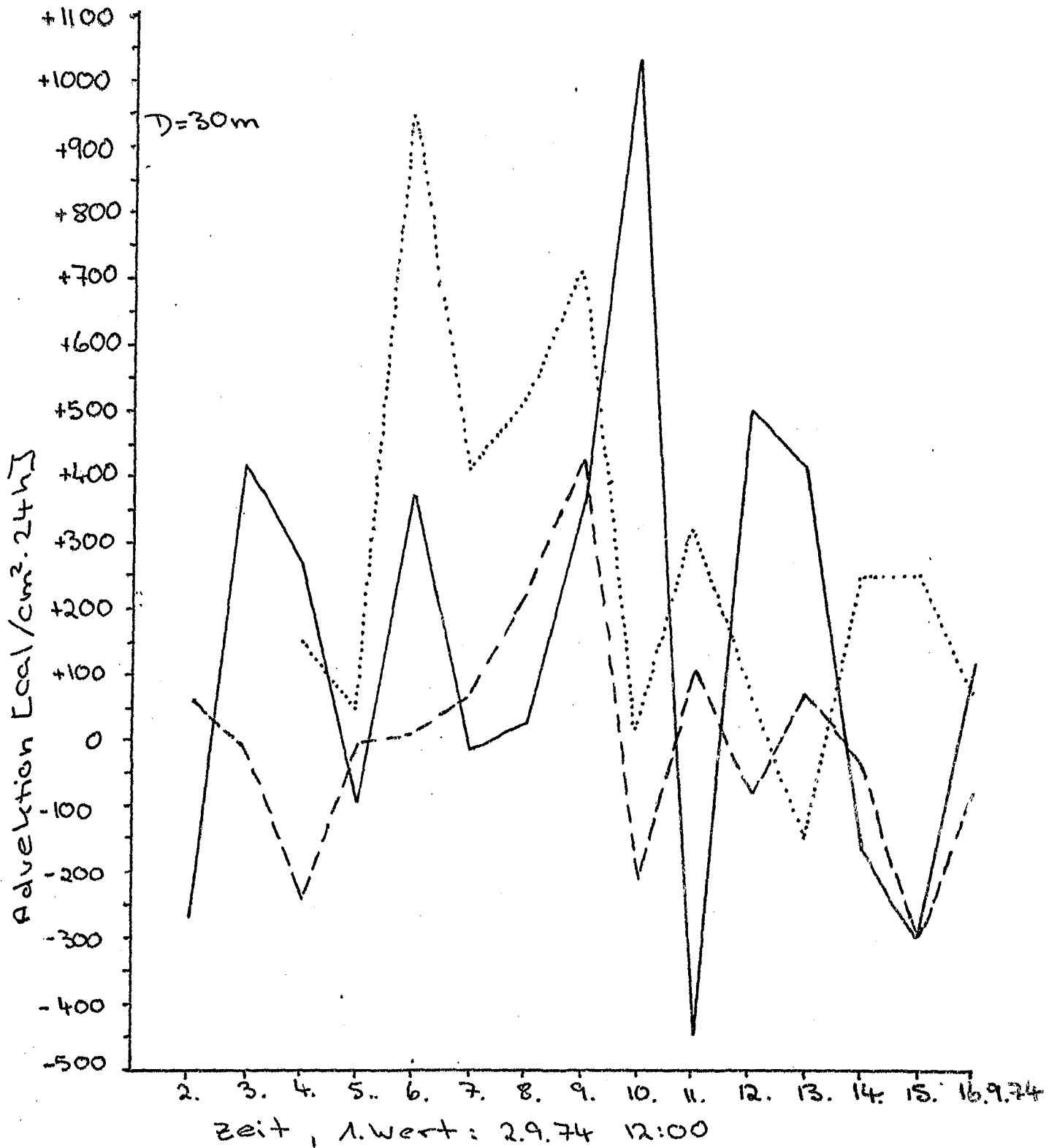


Abb. 18 Vergleich der direkt und indirekt berechneten Advektion

- $Q_N - \frac{\partial H}{\partial t}$ Meteor
- $u \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$ Meteor-Planet
- $u \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$ Meteor-Quadra

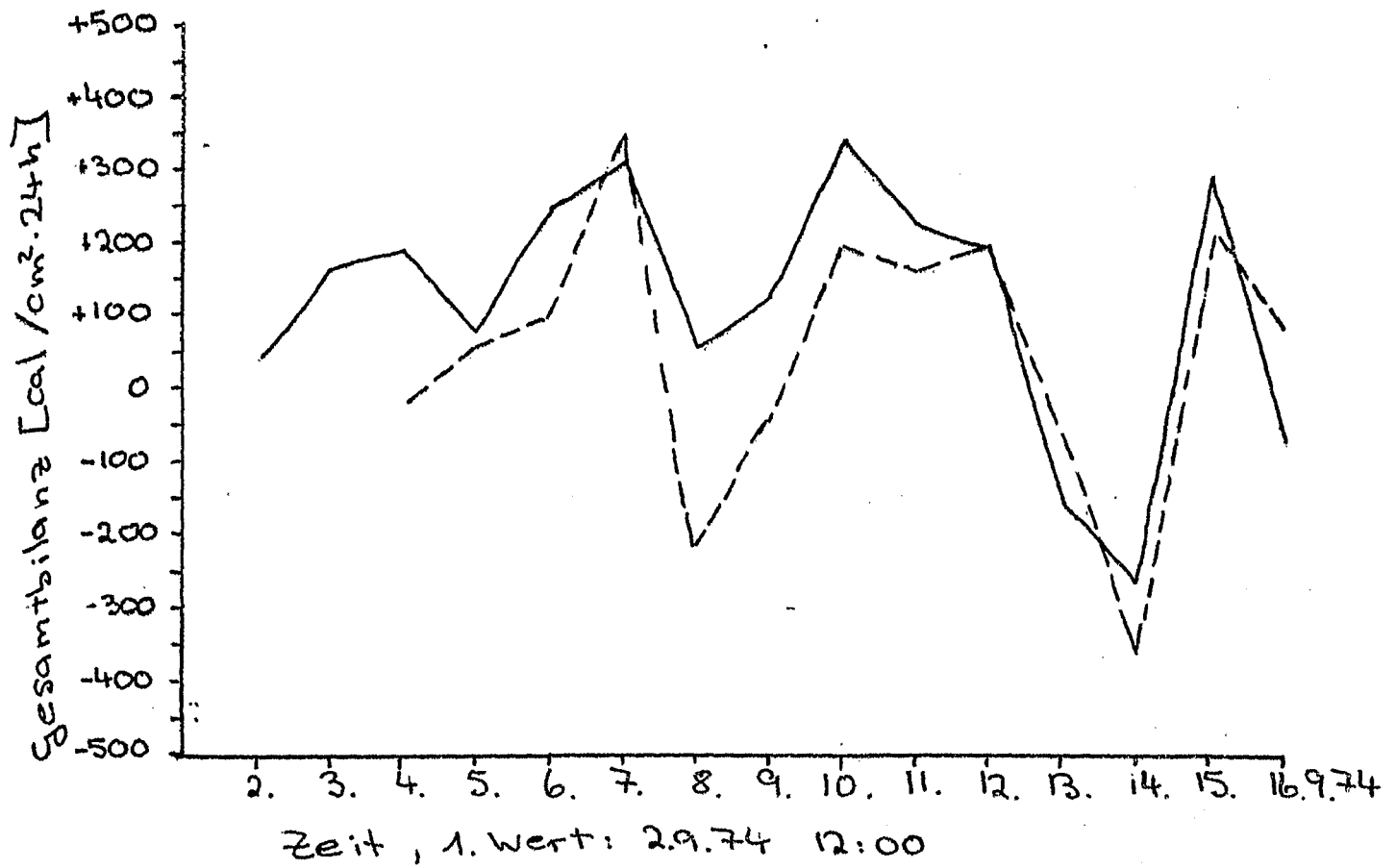


Abb. 19 Differenz der direkt und indirekt berechneten Advektion

— $Q_N - \frac{\partial H}{\partial t} - u \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - v \cdot \frac{\partial H}{\partial y}$, Meteor-Quadra

- - - $Q_N - \frac{\partial H}{\partial t} - u \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - v \cdot \frac{\partial H}{\partial y}$, Meteor-Planet

8. Der Einfluß des Niederschlags auf den Wärmehaushalt

In der Wärmebilanzgleichung (3) wird der Einfluß des Niederschlags auf den Wärmehaushalt vernachlässigt. In diesem Kapitel soll nun untersucht werden, ob diese Vereinfachung gerechtfertigt ist.

In Tab. 7 sind die Niederschlagsraten in mm pro Tag der B/C-Gebiet Schiffe während aller drei Phasen dargestellt (Seguin et al., 1976). Um die Wärmeinhaltsänderungen in Folge von Regenwasser zu bestimmen, werden die Tage mit den stärksten Niederschlägen untersucht, denen auch Temperatur- und Salzgehaltsmessungen der Forschungsschiffe 'Meteor', 'Planet' und 'Quadra' zu Grunde liegen. Am 7.7.74, 13.7.74, 12.8.74 und 14.9.74 treten bei FS 'Meteor' die höchsten Niederschlagsraten auf, während bei WFS 'Planet' am 14.9.74 und bei FS 'Quadra' am 17.7.74, 29.7.74, 31.7.74 und 13.9.74 die stärksten Regenfälle stattfinden. Die stündlichen Temperatur- und Salzgehaltsprofile jener Tage lassen erkennen, daß der Niederschlag sich meist an der Oberfläche in starken Salzgehaltsminderungen von etwa $0.2^{\circ}/\text{oo}$ bemerkbar macht, während die Oberflächentemperatur wenn überhaupt meist nur um 0.1°C abnimmt. Daraus kann man schließen, daß die Temperaturen der Meeresdeckschicht und des Regenwassers annähernd gleich sind. Wenn der Niederschlag eine Temperaturabnahme von 0.1°C einer 5m dicken Deckschicht bewirkt, entspräche dies bei einer Integrationstiefe von 20m einer Wärmeinhaltsverminderung von $50 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$. Dies Beispiel zeigt, daß der Einfluß des Niederschlags bezüglich des Wärmehaushalts vernachlässigbar ist.

Auch Untersuchungen bezüglich der Advektion kälteren Regenwassers nach starken stromaufwärts gelegenen Niederschlägen ergeben, daß das Regenwasser nur eindeutig in den Salzgehaltsprofilen erkennbar ist, und die Temperatur sich kaum ändert.

Schiff	Juni															Juli															Total
	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16										
Dallas				6	2		26					7	12					21	10												84
Gillis							1				23	41	9						52	4											130
Meteor			36	7	1	25	17	1	3		2	73	9	1				46	8	5											234
Oceanographer			8	14	14	9	25		1			147	61					2	11	29											321
Quadra			4	1	2		56	3				16	4					33	33	24	1										175
Researcher			72	95	11	17	31	15	6	10	1	10	122						10	1											401
Vanguard					13	14	36		7			43	58						25	26											222
Vize											7								17	5											29

Tabelle 7a Niederschlagsraten in mm d⁻¹
während der 1. Meßphase
(Seguin et al., 1976)

Juli

August

Schiff	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Total
Dallas	42	4	4	39	1	42	77	8	3	29	2	4		1		5						257
Gillis											5	29		8			3	2	2		7	56
Meteor	29	2	15	3			9	37	19			1	11	6		51						183
Oceanographer										4		6		12		1						23
Quadra		42			44	10	7			5	3	2	24				3	1				145
Researcher	52	10					10	15	1	2						21	2					113
Vanguard			1			28	11	1		6	16	18	19	14	2	19	85					220
Vize							12			5		1		14								32

Tabelle 7b Niederschlagsraten in mm d⁻¹
während der 2. Meßphase
(Seguin et al., 1976)

Schiff	August		September																			Total	
	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
Dallas	1		1	9		13	2			15			98	71	18		7	6					241
Fay				2	7	1	2	1		19			83	85	10		18	8	4	31			271
Gillis			35	2		47					8			32	37		15	33	3			212	
Hecla	14		13	3	6	24	7		1	24			9	6	35	2						144	
Meteor			17	5		11	1	1	1	7			2	19	68	9	25	2				167	
Oceanographer	12		3		26	5	24	1				13	21				24	5				134	
Planet		3	52			16	3	7	10	1			4	7	37	16	5	2	1			164	
Quadra		3	2			31	1	1	7	29	1		3	107	6		10	7				208	
Researcher		1	27	6	45	24	2				1	37	3	1	1		65	4	3			229	
Vanguard							3	5		66	7	8	1	66	44	1	20	1	3			225	
Vize			8				1	1						2	34			8				54	

Tabelle 7c Niederschlagsraten in mm d⁻¹
während der 3. Meßphase
(Seguin et al., 1976)

9. Modell zur Vorhersage statistischer Eigenschaften der Fluktuationen des Deckschichtwärmehaushalts im B/C-Gebiet

Wie man in den vorangehenden Kapiteln erkennen kann, ist der Einfluß der Advektion so groß, daß es nicht möglich ist, eine direkte Wärmebilanz auf Grund von lokalen atmosphärischen Einflüssen aufzustellen. In diesem Kapitel soll nun versucht werden, statistische Aussagen über die Wärmefluktuationen der Deckschicht im B/C-Gebiet zu machen. Dabei geht man davon aus, daß die stromaufwärtigen meteorologischen Ereignisse den Wärmehalt entscheidend beeinflussen, da die dort auf Grund der Einstrahlungsverhältnisse entstandenen Wasserkörper mit der mittleren Strömung an der Meßstation vorbeidriften. In diesem Modell wird vorausgesetzt, daß kein Wärmetransport durch die 20 m tiefe Integrationsgrenze stattfindet. Der Wärmehalt einer 20 m langen Wassersäule wird ausschließlich durch die horizontale Advektion und die Wärmezufuhr aus der Atmosphäre beeinflusst.

Da die horizontale Verteilung der Einstrahlung auf Grund der vorliegenden Daten nicht bekannt ist, dienen als Ausgangsgrößen für dieses Modell die Einstrahlungsverhältnisse, die von FS 'Meteor' gemessen wurden und als Zeitreihe mit einer Abfragerate von einer Stunde vorliegen (Abb. 20). An Hand der Satellitenbilder werden die bewölkungsfreien Tage ermittelt, aus denen wiederum für jede Stunde die maximalen Einstrahlungswerte hergeleitet werden. Man geht weiterhin davon aus, daß diese stündlichen Maximalwerte über die betrachteten 16 Tage der dritten Meßphase hinaus konstant bleiben, daß also die jahreszeitlichen Schwankungen der Einstrahlung unberücksichtigt bleiben (Abb. 21). Aus dem Quotienten zwischen der realen und der maximalen Einstrahlung wird nun der Bewölkungseffekt ermittelt, der darüber eine Aussage macht, welcher Anteil der maximalen Strahlung die Meeresoberfläche erreicht. In diesem Bewölkungseffekt, der in Abb. 22 dargestellt ist, befindet sich ein Tagesgang, der darauf beruht, daß natürlich nachts keine kurzwellige Einstrahlung stattfindet, so daß auch die Bewölkung keinen Einfluß hat. In den Morgen- und Abendstunden, in denen die Strahlungswerte sehr stark ansteigen bzw. abfallen, treten Abweichungen zwischen den stündlichen, kurzwelligen Ein-

strahlungen verschiedener bewölkungsfreier Tage auf. Dadurch entsteht ein Fehler in der maximalen, kurzwelligen Einstrahlung, der zu diesen Tageszeiten oft einen scheinbar großen Bewölkungseffekt hervorruft. Sobald die maximale Einstrahlung unter $20 \text{ cal/cm}^2 \cdot 1\text{h}$ fällt, kann somit die Bewölkung nicht mehr aus den Einstrahlungsverhältnissen hergeleitet werden. Man kann also davon ausgehen, daß nur für 10 Stunden am Tag der Bewölkungseffekt durch den oben genannten Quotienten beschreibbar ist. Auf Grund der Annahme, daß die Bewölkungsfluktuationen gleich verteilt sind, werden die fehlenden Nachtwerte dadurch ersetzt, daß die Tageswerte wiederholt werden. Dabei treten allerdings einige künstlich erzeugte Frequenzen auf (Abb. 23a). Weiterhin wird der Versuch unternommen, die fehlende Nachtphase linear zu interpolieren. Der Einfluß der linearen Interpolation auf die Spektren besteht im wesentlichen aus einer Verringerung der Energiewerte, wie man in den folgenden Spektren erkennen kann.

Die an der Station der FS 'Meteor' beobachteten Wolkenfelder wandern mit der mittleren Windgeschwindigkeit, die in Wolkenhöhe etwa $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ beträgt, nach Westen (Antsipovich, 1975). Geht man davon aus, daß die Wolkenstruktur sich während eines Tages nicht ändert, wobei dieser Zeitraum der mittleren Lebensdauer der Cloud Cluster im B/C-Gebiet entspricht, so kann man die räumliche Ausbreitung der Einstrahlungsverhältnisse herleiten. Ein Zeitraum von einer Stunde entspräche dabei einer räumlichen Ausbreitung von 28.8 km, demzufolge hätten wir nach knapp 18 Stunden eine Überdeckung von circa 500 km, also etwa dem Durchmesser des B/C-Gebiets.

Auf Grund der räumlichen Verteilung der Wärmezufuhr aus der Atmosphäre in den Ozean erhält man eine horizontale Wärmeinhaltsstruktur der Deckschicht, die mit der mittleren Advektionsgeschwindigkeit von circa $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ nach Osten wandert. Dabei wird sie wiederum von den lokalen atmosphärischen Einflüssen überlagert. Der Wärmeinhalt einer 20 m langen Wassersäule an einem Ort x_0 setzt sich zusammen aus dem Wärmeinhalt des Wasserkörpers, der mit der mittleren Advektionsgeschwindigkeit der Deckschicht nach der Zeit dt den Ort x_0 erreicht, und der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche während der

Zeit dt . Der Wärmegewinn aus der Atmosphäre ergibt sich aus dem Bewölkungseffekt, der mit der jeweiligen maximalen, kurzwelligen Einstrahlung multipliziert wird. Die langwellige Ein- und Ausstrahlung und die latenten und sensiblen Wärme-flüsse werden, da sie keinen Tagesgang besitzen, über die dritte Meßphase gemittelt. Ihre Summe ergibt $-13 \text{ cal/cm}^2 \cdot 24\text{h}$, die bei der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche berücksichtigt wird. Mit Hilfe der folgenden Gleichung wird für verschiedene Zeitpunkte die horizontale Wärmeinhaltsstruktur eines 345.6 km langen Gebietes ermittelt.

$$H(x,t) = H(x-dx, t-dt) + \int_{t-dt}^t (K_{\downarrow}/K_{\downarrow \max}(x,t) \cdot K_{\downarrow \max}(t) + L_{\downarrow} + L_{\uparrow} + Q_v + Q_k) \cdot dt$$

Dabei bedeuten

$H(x,t)$	Wärmeinhalt am Ort x zum Zeitpunkt t
$H(x-dx, t-dt)$	Wärmeinhalt, der mit der mittleren Advektionsgeschwindigkeit $dx/dt = 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ nach Osten wandert
$\int_{t-dt}^t K_{\downarrow}/K_{\downarrow \max}(x,t) \cdot K_{\downarrow \max}(t) \cdot dt$	Kurzwellige Einstrahlung während der Zeit dt
$L_{\downarrow}, L_{\uparrow}$	Langwellige Ein- und Ausstrahlung über die dritte Meßphase gemittelt
Q_v, Q_k	Latenter und sensibler Wärme fluß über die dritte Meßphase gemittelt

In Übereinstimmung mit der ersten Wärmeinhaltsmessung von FS 'Meteor' zu Beginn der dritten Meßphase wird der Anfangswärmeinhalt des gesamten Gebietes folgendermaßen gewählt:

$$H(x,0) = 53400 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}.$$

Ebenso groß wird der Wärmeinhalt festgesetzt, der auf Grund der mittleren Strömung in der Deckschicht der betrachteten Region von Westen zugeführt wird. Die Randbedingung für die westliche Begrenzung des 345.6 km langen Gebietes lautet

$$H(0,t) = 53400 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}.$$

Die Größe des Gebietes, an dessen östlichem Rand FS 'Meteor' stationiert war, entspricht der Ausbreitung der Bewölkung in 12 Stunden. Da auf Grund der stündlichen, meteorologischen Messungen nur alle 28.8 km ein Meßwert zur Verfügung steht, werden jeweils 19 Werte linear interpoliert, so daß der neue Werteabstand 1.44 km beträgt. Ein Wasserkörper, der sich mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Deckschicht nach Osten bewegt, legt diesen Weg in einer Stunde zurück.

Sechzehn Tage lang wird für jede Stunde alle 1.44 km der Wärmeinhalt des betrachteten Gebietes bestimmt.

Mit dem folgenden Vergleich der Energiedichtespektren des gemessenen und für die Station von FS 'Meteor' berechneten Wärmeinhalts wird ermittelt, inwieweit eine Kopplung zwischen der räumlichen Bewölkungsverteilung und dem Wärmeinhalt vorhanden ist. In Abb. 24 sind die Energiedichtespektren dargestellt, wobei 8 Teilstücke mit 50% Überlappung verwendet werden, die eine hohe Auflösung bewirken. Die durchgezogene Linie bezeichnet das Spektrum des von FS 'Meteor' während der dritten Meßphase gewonnenen Wärmeinhalts. Die gestrichelte Linie stellt das Spektrum des berechneten Wärmeinhalts dar, wobei der während der Nachtphase linear interpolierte Bewölkungseffekt verwendet wurde. Zunächst beträgt der Abfall beider Spektren etwa $\omega^{-0.6}$. Bei der Frequenz $\omega = 5 \cdot 10^{-2}$ cph erhöht er sich auf ω^{-5} . Während das Spektrum des berechneten Wärmeinhalts diesen Abfall beibehält, verringert sich der spektrale Abfall des gemessenen Wärmeinhalts bei einer Periode von 8 Stunden auf circa $\omega^{-0.7}$. Demzufolge liegt im hochfrequenten Bereich die Energiedichte des berechneten Wärmeinhalts eindeutig unterhalb der des gemessenen. Eine Erklärung hierfür bieten die linear interpolierten Nachtwerte, die den hohen Frequenzen keine Energie zukommen lassen. Deshalb wird nun der Wärmeinhalt mit Hilfe des Bewölkungseffekts berechnet, bei dem während der Nachtphase die Tageswerte wiederholt werden. Sein Spektrum wird durch die gepunktete Linie dargestellt. Bis zu der Periode von 7 Stunden entspricht es dem Spektrum des gemessenen Wärmeinhalts. Bei kürzeren Perioden liegen die Energiedichtewerte des neu berechneten Wärmeinhalts unterhalb denen des gemessenen, aber sie sind doch wesentlich höher als die des mit Hilfe des linear interpolierten Bewölkungseffekts berechneten Wärmeinhalts. Die hohe Energiedichte des aus den gemessenen Daten gewonnenen Spektrums im hochfrequenten Bereich läßt sich auf den 'Aliasing-Effekt' zurückführen. Dieser Effekt bewirkt, daß bei einem Abfrageintervall von einer Stunde alle Energiebeträge, die zu kurzperiodischen Vorgängen mit Perioden kleiner als zwei Stunden gehören, das Energieniveau im niederfrequenten Bereich anhe-

ben. Somit wird das wahre Spektrum im kurzperiodischen Bereich zwischen dem des gemessenen und dem des mit Hilfe der linear interpolierten Werte berechneten Wärmeinhalts liegen. Das Energiedichtespektrum des neu berechneten Wärmeinhalts, wobei die Tageswerte des Bewölkungseffekts in der Nachtphase wiederholt werden, kommt dem wahren Spektrum wohl am besten nahe.

Die Unterschiede der Spektren des gemessenen und berechneten Wärmeinhalts liegen bis zu einer Periode von 8 Stunden innerhalb der 95% Vertrauensgrenzen. Im hochfrequenten Bereich treten größere Abweichungen auf, die teils auf den 'Aliasing-Effekt' und auf die Verwendung von linear interpolierten Werten bei dem Bewölkungseffekt zurückzuführen sind. Im langperiodischen Bereich eignet sich dieses Modell sehr gut, um die Fluktuationen des Wärmeinhalts aus den räumlichen Einstrahlungsverhältnissen herzuleiten. Im kurzperiodischen Bereich spiegelt das Energiedichtespektrum des neu berechneten Wärmeinhalts das wahre Spektrum recht gut wider.

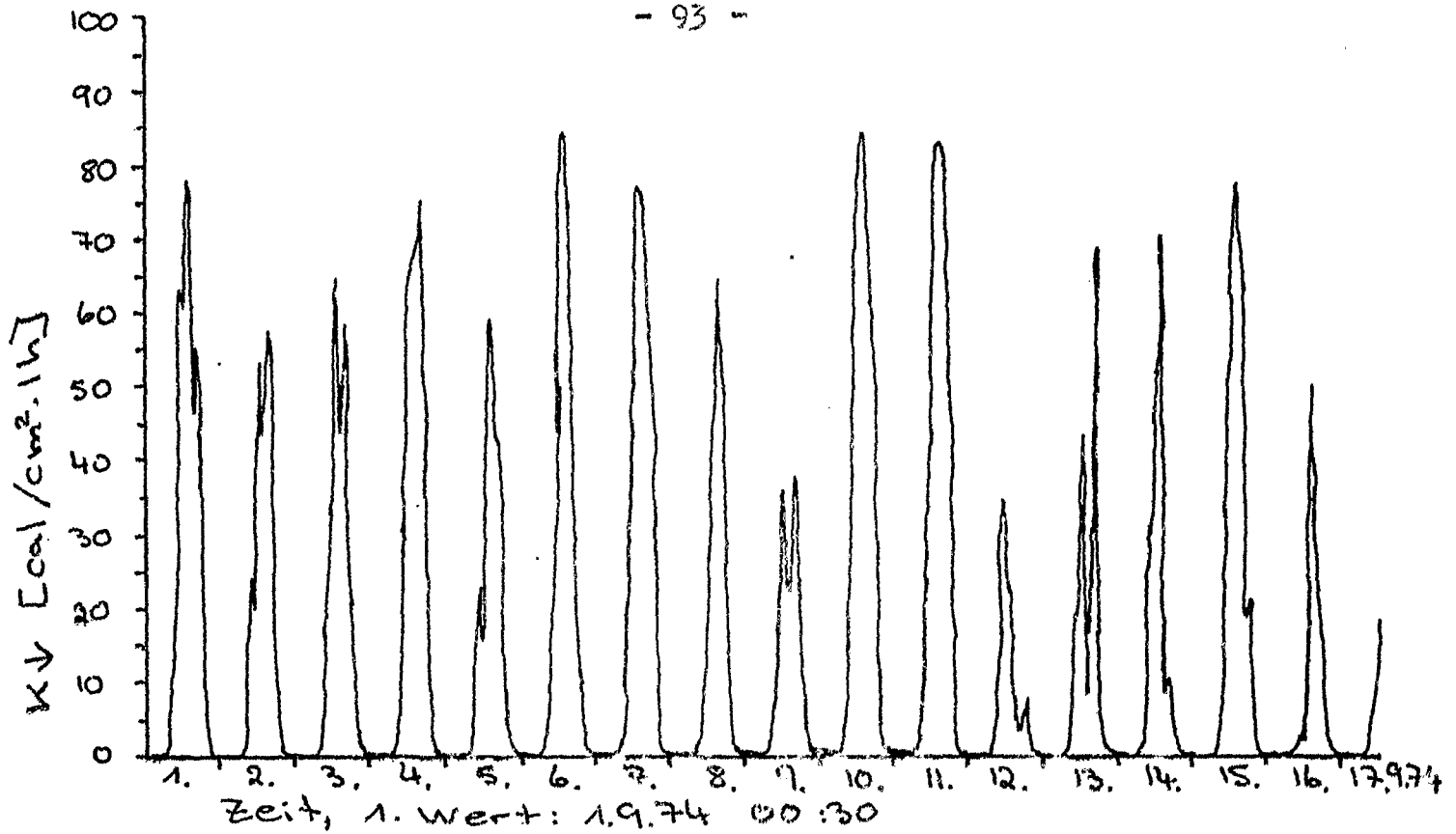


Abb. 20 Die stündlichen, kurzwelligen Einstrahlungsverhältnisse bei FS 'Meteor'

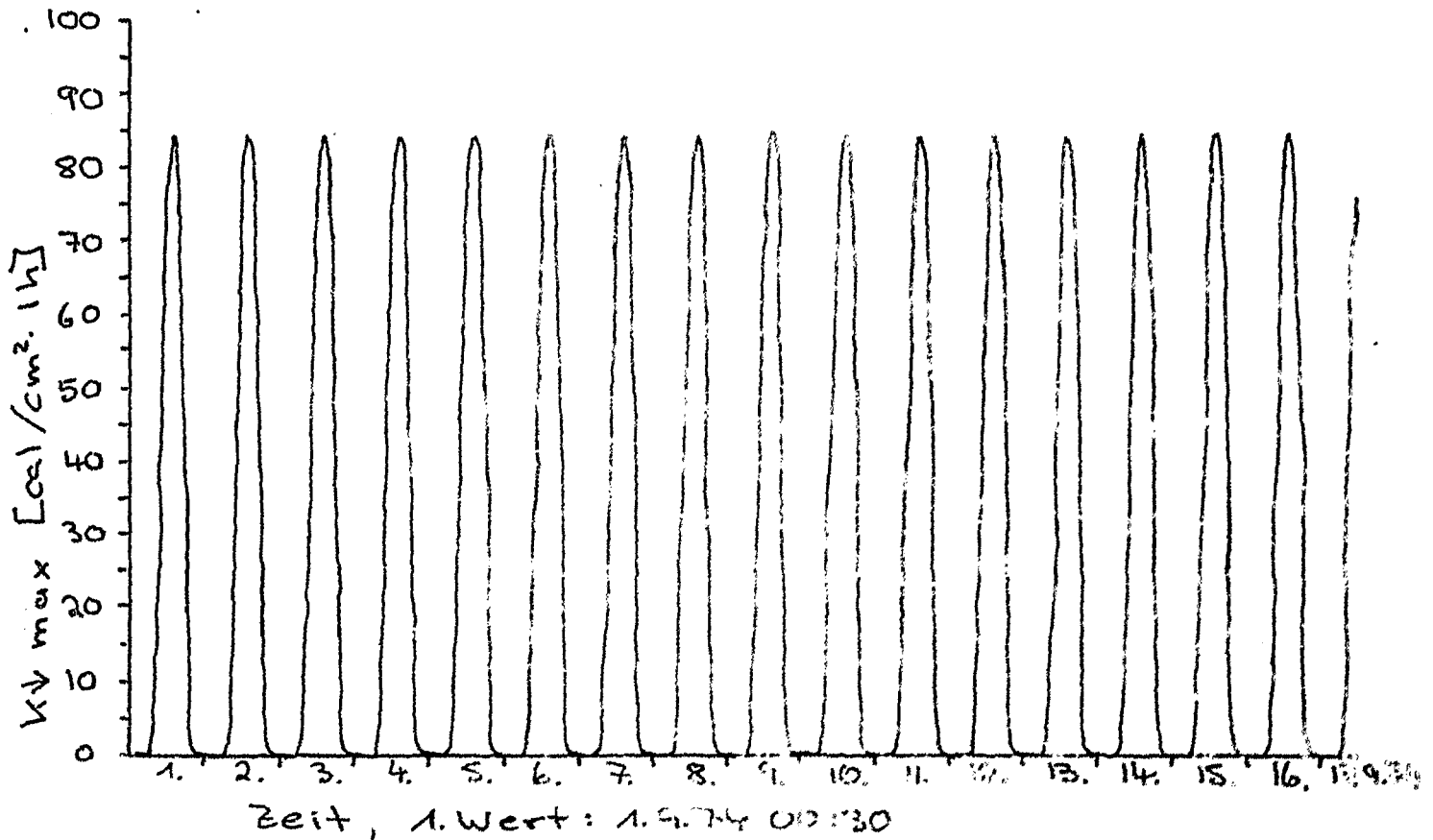


Abb. 21 Die maximale, kurzwellige Einstrahlung während der 3. Meßphase

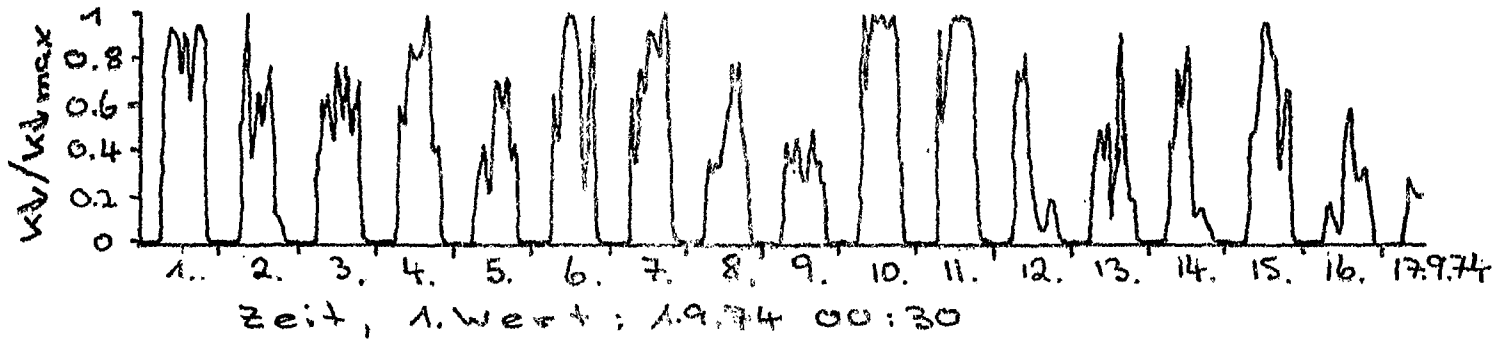


Abb. 22 Der Bewölkungseffekt

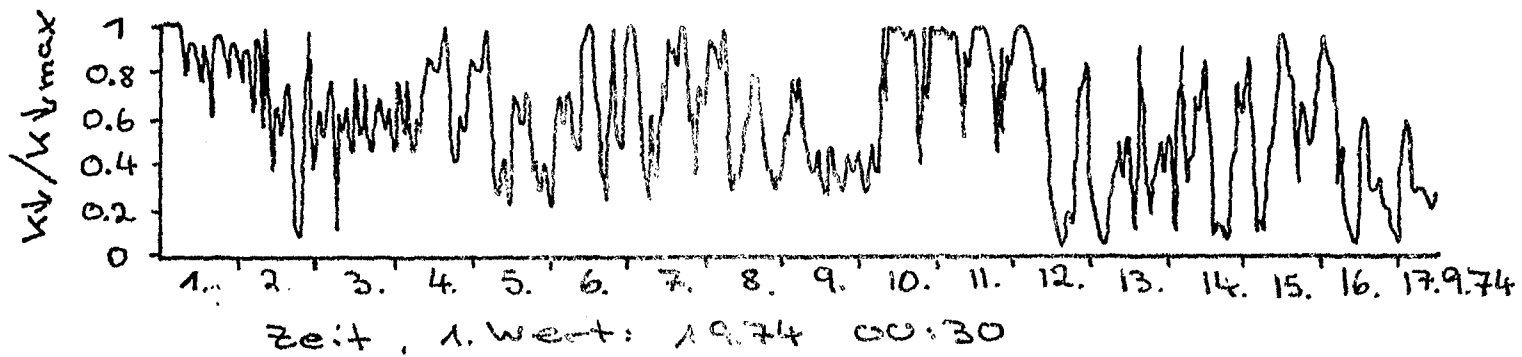


Abb. 23a Der Bewölkungseffekt mit der Wiederholung
der Tageswerte während der Nachtphase

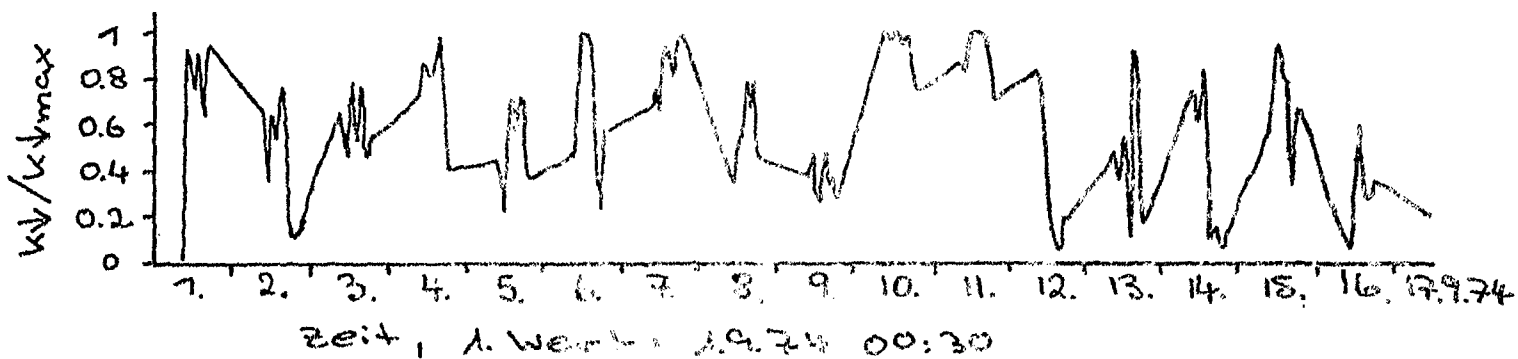


Abb. 23b Der Bewölkungseffekt mit linear interpolierten
Werten während der Nachtphase

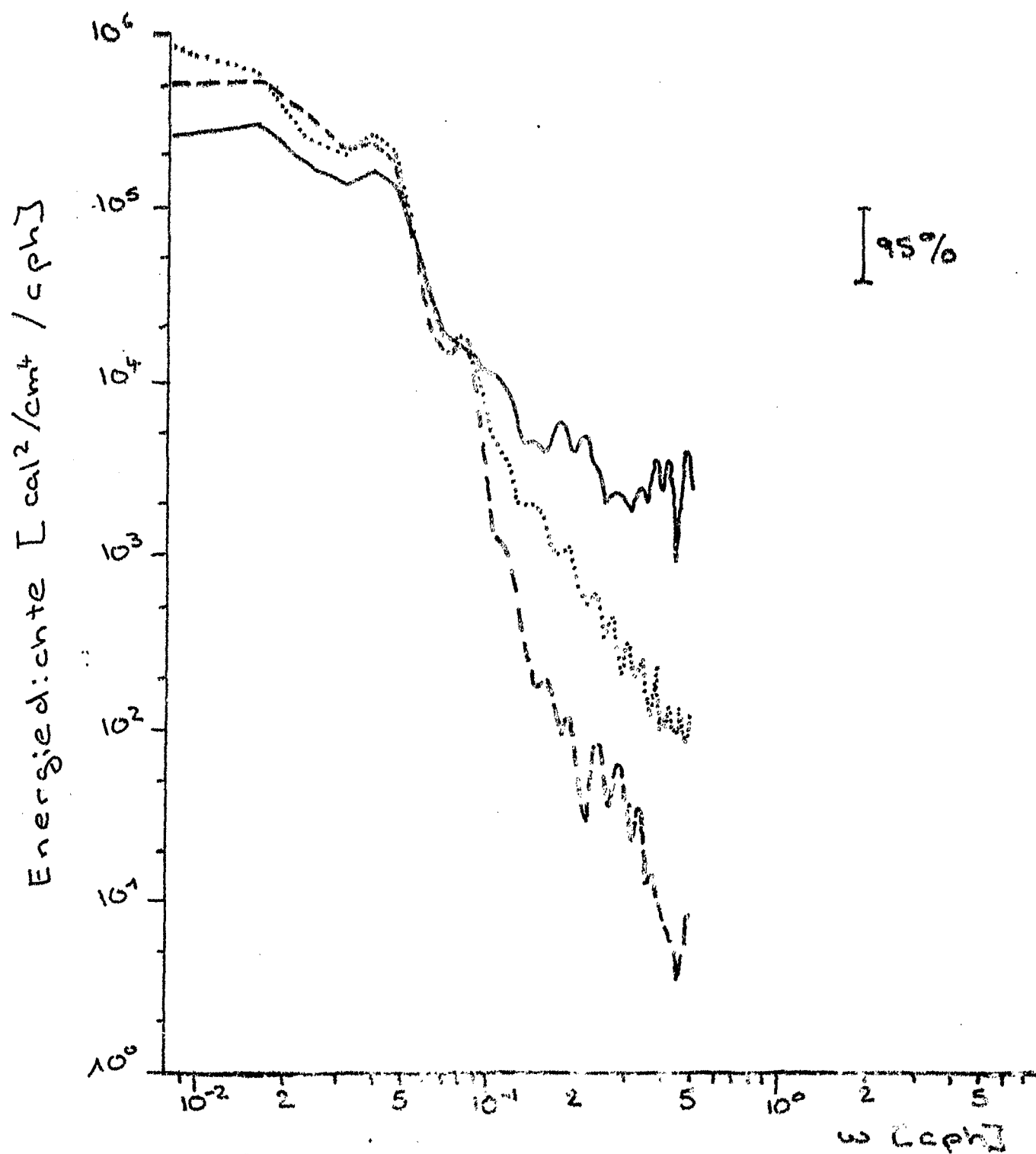


Abb. 24b Die Energiedichtespektren des gemessenen (—) und berechneten Wärmeinhalts bei FS 'Meteor'

10. Zusammenfassung

In Folge der hydrographischen und atmosphärischen Gegebenheiten der Region, in der das GATE Experiment 1974 stattfand, treten Schwierigkeiten auf, eine direkte Wärmebilanz für das Meßgebiet aufzustellen. Ein Vergleich zwischen der lokalen Wärmezufuhr aus der Atmosphäre und der Änderung des Wärmeinhalts ergibt, daß die Advektion bezüglich des Wärmehaushalts eine wichtige Rolle spielt. Wie von vornherein angenommen wurde, ist nur eine dreidimensionale Betrachtungsweise sinnvoll. Die gesamte Wärmebilanz ist somit von einer genauen Bestimmung der advektiven Terme abhängig, da sie stark durch die großräumigen atmosphärischen Ereignisse beeinflußt wird und weniger von den lokalen kurzfristigen Vorgängen abhängig ist. Dies erkennt man deutlich bei den Untersuchungen der stündlichen Wärmeinhalte, die sehr langsam auf plötzlich starke Einstrahlungen reagieren. In den Wärmeinhalten ist auch kein Tagesgang erkennbar.

Ein Vergleich zwischen der direkt und indirekt berechneten Advektion zeigt, daß erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Größen auftreten. Leider waren die Meßstationen zu weit voneinander entfernt, um den horizontalen Wärmeinhaltsgradienten gut berechnen zu können und um somit genauere Ergebnisse der direkt berechneten Advektion zu erzielen. Weiterhin konnten die im Stromfeld vorhandenen Konvergenzen und Divergenzen nicht berücksichtigt werden, die ebenfalls Ungenauigkeiten in der Bestimmung der advektiven Terme hervorrufen.

Sehr gute Übereinstimmungen der Wärmeinhalte findet man bei den Stationen, die in Stromrichtung zueinander liegen, aber auch zu etwas weiter abseits gelegenen Stationen sind die Unterschiede sehr gering. In den meisten Fällen sind ähnliche lineare Trends der Wärmeinhalte bzw. seiner Änderungen zu beobachten, die aber mit denen der meteorologischen Parameter nicht übereinstimmen. Weiterhin war während der dritten Meßphase eine Abnahme der Wärmeinhalte zu erkennen, obwohl Wärme von der Atmosphäre in den Ozean gelangte. Eine Erklärung für diese beiden Diskrepanzen beruht wiederum auf den advektiven

Termen, wobei die mittlere Strömung in der Deckschicht kühleres Wasser aus der südwestlichen Region mit sich bringt. Die Tatsache, daß am Ende der dritten Meßphase der Wärmeinhalt bei FS 'Meteor' wieder leicht ansteigt, läßt auf eine Verringerung der Advektion kühleren Wassers schließen.

Außerdem wird beobachtet, daß der Niederschlag bezüglich des Wärmehaushalts in dieser Region vernachlässigt werden kann, da sich die Regenfälle nur in den Salzgehaltsprofilen und nicht in den Temperaturprofilen wesentlich auswirken.

Aus dem letzten Abschnitt der Arbeit ergibt sich, daß die Spektren des gemessenen und des mit einem Modell berechneten Wärmeinhalts bis zu einer Periode von 8 Stunden innerhalb der 95% Vertrauensgrenzen übereinstimmen. Der Berechnung des Wärmeinhalts liegen dabei die zeitlich veränderlichen Einstrahlungsverhältnisse eines etwa 350 km langen Gebiets zu Grunde. Weiterhin wird die mittlere Advektionsgeschwindigkeit in der Deckschicht berücksichtigt, so daß sich der Wärmeinhalt an einem Ort zusammensetzt aus der Wärmezufuhr durch die Meeresoberfläche und dem in Folge der mittleren Strömung advektierten Wärmeinhalt. Bei der ersten Berechnung wird der Bewölkungseffekt verwendet, dessen Nachtwerte linear interpoliert wurden und somit eine Verringerung der Energiedichte im hochfrequenten Bereich bewirken. Der zweiten Berechnung liegt ein Bewölkungseffekt zu Grunde, in dessen Nachtphase die Tageswerte wiederholt werden. Ein Vergleich zwischen den Spektren des gemessenen und neu berechneten Wärmeinhalts ergibt Abweichungen im hochfrequenten Bereich, die teilweise auf den 'Aliasing-Effekt' zurückzuführen sind. Bei kurzen Perioden wird das wahre Energiedichtespektrum am besten durch das des neu berechneten Wärmeinhalts dargestellt. Im niederfrequenten Bereich eignet sich das beschriebene Modell sehr gut, um die Fluktuationen des Wärmeinhalts aus den räumlichen Einstrahlungsverhältnissen herzuleiten.

Literaturverzeichnis

Antsipovich, V.A.; Snitkovsky, A.I.; Falkovich, A.I.

1975 On the Orders of the Values of the Meteorological Elements obtained in the A/B-array in the Period of GATE.

GATE Report No. 14

Preliminary Scientific Results (Vol.2)

Arkell, R.; Hudlow, M.

1977 GATE International Meteorological Radar Atlas.

U.S. Department of Commerce, N.O.A.A. Washington D.C.

Brockmann, C.; Meincke, J.; Peters, H.; Siedler, G.; Zenk, W.

1975 GATE Oceanographic activities on F.R.G. research vessels.

Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität-Kiel, Nr. 19

Cornus, H.P.

1977 Untersuchungen zu Deckschichtänderungen und zur Anwendbarkeit eindimensionaler Deckschichtmodelle im äquatorialen Atlantik während GATE 1974.

Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität-Kiel, Nr. 47

Dietrich, G.; Kalle, K.; Krauss, W.; Siedler, G.

1975 Allgemeine Meereskunde, 3. Auflage.

Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart

Fofonoff, N.P.; Hayes, S.P.; Millard, Jr., R.C.

1974 W.H.O.I./Brown CTD Microprofiler: Methods of Calibration and Data Handling.

W.H.O.I. Technical Report Ref.No. 74-89
(unveröffentlichtes Manuskript)

Halpern, D.; Reed, R.K.

1976 Heat Budget of the Upper Ocean under Light Winds.

Journal of Physical Oceanography Volume 6, p.972-975

Käse, R.H.; Peters, H.; Siedler, G.; Zenk, W.

1978 A Compilation of Current, Temperature and Conductivity

Data from Moorings F1 and F2 in the GATE C-Area
'Meteor'Forsch.Ergebnisse, Reihe A, 20, p.13-48

Krauss, W.

1973 Methods and Results of Theoretical Oceanography.
Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart

Martin, D.W.

1975 Characteristics of West African and Atlantic Cloud
Clusters Based on Satellite Data.
GATE Report No. 14
Preliminary Scientific Results (Vol.1)

Peters, H.

1976 GATE CTD Data measured on the F.R.G. Ships
Shipboard Operations-Calibration-Editing.
Technical Report
Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der
Christian-Albrechts-Universität-Kiel, Nr. 22

Seguin, W.R., Sabol, P.

1976 GATE Convection Subprogramm
Data Center: Shipboard
Precipitation Data
N.O.A.A. Technical Report, EDS 18

Seguin, W.R.; Crayton, R.B.; Sabol, P.; Carlile, J.W.

1978 GATE Convection Subprogramm
Data Center:
Final Report on Ship Surface
Data validation
N.O.A.A. Technical Report, EDS 25

WMO

1975 The GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE)
Progress Report on the GATE Oceanic Boundary Layer
(C-Scale) Experiment
Vol. 2
World Meteorological Organization